

**AVALIAÇÃO DO USO DE REATOR ANAERÓBIO HORIZONTAL DE LEITO
FIXO NO TRATAMENTO DE VINHAÇA SOB CONDIÇÕES TERMOFÍLICAS.**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço:.....20/07/01.....
Ass.:.....*Guilherme*.....

MARCIA TELH

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA À
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO
CARLOS, UNIVERSIDADE DE SÃO
PAULO, COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM
HIDRÁULICA E SANEAMENTO.**

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036718

ORIENTADOR: PROF. DR. EUGÊNIO FORESTI



SÃO CARLOS / 2001.

Class.	TESE-CCSC
Cult.	5980
Tombo	T0169/01

st 1197354

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

T271a Telh, Marcia
Avaliação do uso de reator anaeróbico horizontal de
leito fixo no tratamento de vinhaça sob condições
termofílicas / Marcia Telh. -- São Carlos, 2001.

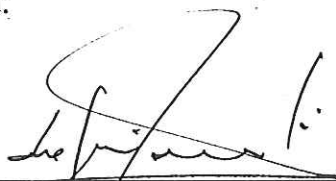
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.
Área : Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Eugênio Foresti.

1. Processo anaeróbico. 2. Vinhaça. 3. Condições
termofílicas. 4. Adaptação do lodo anaeróbico.
I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **MARCIA TELH**

Dissertação defendida e aprovada em 04-05-2001
pela Comissão Julgadora:



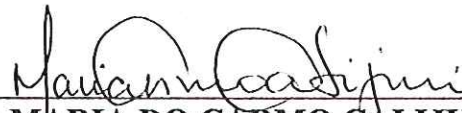
Prof. Titular **EUGENIO FORESTI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **MARCELO ZAIAT**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **ROQUE PASSOS PIVELI**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



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



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

*A meus pais, Otomar e Jemilda,
minha avó Ermínia, pelo apoio,
amor e paciência.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Eugênio Foresti, pela orientação, amizade, compreensão e apoio;

A Professora Elizabete Moraes e Janja, pelo auxílio e carinho;

A Isabel e Bernardete, pelo ensino e auxílio nas análises microbiológicas;

A Lorena Grein Tavares Vieira, pelo auxílio e ensino durante a parte experimental e nas análises microscópicas;

As companheiras Cláudia, Flávia, Lienne, Luciana, pelas palavras de apoio e amizade;

Ao Grupo de Resíduos Sólidos da Universidade de Caxias do Sul, principalmente a Neide Pessin;

A Usina da Serra, pela doação da vinhaça;

Aos professores e funcionários do SHS/EESC/CSP, enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho;

Ao CNPQ, pela bolsa concedida;

A meu grande amor, por aparecer em minha vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1 – INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS	3
3 - REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1 - A Vinhaça	4
3.2 - O Processo de Digestão Anaeróbia	7
3.3 - Adaptação do Lodo Mesofílico para Termofílico	13
3.4 - Tratamento Biológico da Vinhaça	14
3.5 - Características do Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo	15
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 – Montagem e Descrição do Sistema de Tratamento	23
4.2 – Definição dos Parâmetros Operacionais	24
4.3 – Inoculação e Partida do Reator	27

4.4 – Adaptação do Lodo	29
4.5 – Operação do Reator	29
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1 – Inoculação e Partida do Reator	32
5.2 – Adaptação do Lodo	43
5.3 – Operação do Reator	53
6 – CONCLUSÕES	59
7 – SUGESTÕES	60
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relações Metabólicas no Processo Anaeróbio.	8
Figura 2 - Esquema de Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo (RAHLF) em escala de bancada.	24
Figura 3 – Curva de Calibração da Bomba Peristáltica - Ismatec.	25
Figura 4 - Desenho do Sistema em Circuito Fechado.	28
Figura 5 - Desenho Esquemático do Sistema para Evitar o Sifonamento do Reator.	28
Figura 6 – Pontos de Coleta de Gases no RAHLF.	30
Figura 7 – Dados Comparativos de pH – Circuito Aberto.	33
Figura 8 – Dados Comparativos de Alcalinidade a Bicarbonatos – Circuito Aberto.	34
Figura 9 – Dados Comparativos de Ácidos Orgânicos Voláteis – Circuito Aberto.	34
Figura 10 – Dados Comparativos da DQO filtrada – Circuito Aberto.	35
Figura 11 – Dados Comparativos da DQO filtrada – Circuito Fechado.	38
Figura 12 – Dados Comparativos de pH – Circuito Fechado.	39
Figura 13 – Dados Comparativos de Alcalinidade a Bicarbonatos – Circuito Fechado.	40
Figura 14 – Dados Comparativos de Ácidos Orgânicos Voláteis – Circuito Fechado.	40
Figura 15 – Presença de Bacilos na Amostra (T = 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).	50
Figura 16 – Bacilos Segmentados (T = 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).	50
Figura 17 – Visão de Aglomerado de Bacilos (T = 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).	51
Figura 18 – Presença de Bacilos e Cocos (T = 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).	51

Figura 19 – Bacilo Curvo (T = 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).	52
Figura 20 – Presença de Cocos na Amostra (T = 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).	52
Figura 21 – Dados Comparativos da DQO filtrada – Operação.	55
Figura 22 – Dados Comparativos de pH – Operação.	55
Figura 23 – Dados Comparativos de Alcalinidade a Bicarbonatos – Operação.	56
Figura 24 – Dados Comparativos de Ácidos Orgânicos Voláteis – Operação.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da vinhaça resultante de mostos de caldo de cana e de mostos misto de caldo(proveniente da moagem da cana) e melaço (efluente proveniente do processo de fabricação do açúcar).	7
Tabela 2 - Definição dos microrganismos de acordo com suas temperaturas cardinais de crescimento.	10
Tabela 3 – Calibração da Bomba Peristáltica – marca Ismatec Utilizada no Experimento.	25
Tabela 4 - Características Físico-Químicas da Vinhaça.	27
Tabela 5 – Dados Obtidos no Monitoramento do Afluente na Partida do Reator Enquanto o Reator se Encontrava em Circuito Aberto.	32
Tabela 6 – Dados Obtidos no Monitoramento do Efluente na Partida do Reator Enquanto o Reator se Encontrava em Circuito Aberto.	32
Tabela 7 – Eficiência de Remoção de DQO filtrada, no período que varia do dia 10/08/98 a 25/08/98.	35
Tabela 8 – Composição das Amostras Gasosas Coletadas no Período de Partida do Reator em Circuito Aberto em Porcentagem.	36
Tabela 9 – Dados das Análises ao Longo do Reator.	36
Tabela 10 – Dados Obtidos no Monitoramento do Reator em Circuito Fechado – Afluente.	37
Tabela 11 – Dados Obtidos no Monitoramento do Reator em Circuito Fechado- Efluente.	38
Tabela 12 – Eficiência de Remoção de DQO.	41
Tabela 13 – Composição das Amostras Gasosas Coletadas no Período de Partida do Reator em Circuito Aberto em Porcentagem.	42
Tabela 14 – Composição das Amostras Gasosas Coletadas no Período de Partida do Reator em Circuito Fechado em Porcentagem.	42
Tabela 15 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 37° C, no dia 25/09/98.	43
Tabela 15 A – Planilha de Microscopia, Amostra do Dia 25/09/98 na Temperatura de 37°C.	44

Tabela 16 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 40° C, no dia 28/09/98.	45
Tabela 16 A - Planilha de Microscopia, Amostra do Dia 30/09/98 na Temperatura de 40°C.	45
Tabela 17 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 43° C, no período de Adaptação - Dados do Afluente.	46
Tabela 18 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 43° C, no período de Adaptação - Dados do Efluente.	46
Tabela 17 A - Planilha de Microscopia, Amostra do Dia 19/10/98 na Temperatura de 47°C.	47
Tabela 19 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 50° C, no período de Adaptação - Dados do Afluente.	47
Tabela 20 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 50° C, no período de Adaptação - Dados do Efluente.	48
Tabela 19 A - Planilha de Microscopia, Amostra do Dia 29/10/98 na Temperatura de 50°C.	48
Tabela 21 – Dados de Composição do Gás Obtidos no Período de Adaptação.	49
Tabela 21 – Dados Obtidos no Monitoramento do Afluente na Operação do Reator.	53
Tabela 22 – Dados Obtidos no Monitoramento do Efluente na Operação do Reator.	54
Tabela 23 – Eficiência de Remoção da DQO Filtrada.	54
Tabela 24 – Composição do Gás em Amostras Gasosas Coletadas no Período de Partida do Reator em Circuito Aberto, em Porcentagem.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A - Área da Seção Transversal do Reator
Afl. - Afluente
Alc. Total – Alcalinidade Total
Alc. a Bic. – Alcalinidade a Bicarbonato
Alc. a AV – Alcalinidade a Ácidos Voláteis
AOV – Ácidos Orgânicos Voláteis
AVT – Ácidos Voláteis Totais
C/N – Relação Carbono Nitrogênio
C – Concentração
CaCO₃ – Carbonato de Cálcio
CH₄ - Metano
Ci – Concentração Inicial
Cl⁻ - Cloreto
CO₂ – Gás Carbônico
DQO:N:P - Demanda Química de Oxigênio: Nitrogênio: Fósforo
DTR – Distribuição do tempo de Residência
D/UL – Número de Dispersão
Efl. – Efluente
H₂ – Gás Hidrogênio
H₂O – Água
k_sa – Constante de Consumo de Substrato
K_s – Constante de Saturação de Substrato
L/D – Comprimento/Diâmetro
N - Número de Reatores CSTR em Série
NADH – Nicotinamida adenina dinucleotídeo na sua forma reduzida após receber um íon hidreto (H⁺)
Na⁺ - Cátion Sódio
PCP - Penta Cloro Fenol
pH – Potencial Hidrogeniônico
Q – Vazão Volumétrica do Líquido
RAHLF – Reator Anaeróbio Horizontal e Leito Fixo

$r_{m\acute{a}x}$ – Constante Cinética da velocidade máxima específica de consumo de substrato

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

SF – Sólidos Fixos

SST – Sólidos em Suspensão Totais

SSV – Sólidos em Suspensão Voláteis

TDH – Tempo de Detenção Hidráulico

UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket

v_s - Velocidade Superficial do Líquido

V_T – Volume Total

V_u – Volume Útil

ϵ - Porosidade do Leito

θ_h - Tempo de Residência Hidráulico

RESUMO

TELH, M. Avaliação do Uso de Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo no Tratamento de Vinhaça sob Condições Termofílicas. São Carlos, 2001, 63p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O presente trabalho propõe-se a verificar a viabilidade de utilização do reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) para o tratamento de vinhaça sob condições termofílicas, com ênfase etapa de partida do reator. O RAHLF tem sido utilizado com êxito no tratamento de diversos efluentes sob condições mesofílicas, em experimentos de bancada. Referências bibliográficas indicam que reatores do tipo UASB tratando vinhaça sob condições termofílicas, atingem remoção de DQO da ordem de 70% e composição do gás com 60% de metano. Neste experimento, os dados obtidos de remoção de DQO foram de aproximadamente 70%, para valores de DQO afluente da ordem de 10.000mg/l e porcentagem de metano no gás de 63%, dados esses que indicam a viabilidade do tratamento termofílico da vinhaça neste reator. Ressalta-se a natureza de pesquisa exploratória desta etapa dos trabalhos, sendo necessária a realização de etapa complementar visando otimizar o tempo de detenção hidráulica e a carga orgânica máxima a ser utilizada. Como um estudo preliminar os resultados foram satisfatórios.

Palavras-chave: Processo Anaeróbio; Vinhaça; Condições Termofílicas; Adaptação do Lodo Anaeróbio.

ABSTRACT

TELH, M. Evaluation of the use of the Horizontal Anaerobic Immobilized Sludge Reactor in the Vinasse Treatment under Termophilic Conditions. São Carlos, 2001, 63p. MSc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The present work proposes to verify the viability to use the Horizontal Anaerobic Immobilized Sludge (HAIS) reactor for the vinasse treatment in termophilic conditions, with emphasis in the reactor departure. The HAIS reactor has being to utilize with success on the treatment of many effluents under mesophilic conditions in workbench experiments. Bibliographic references indicate that reactors the UASB kind treat vinasse under termophilic conditions, arrive removal the COD (chemical oxygen demand) in the order the 70% and gas composition with 60% of methane. In this experiment, the data obtained the removal of COD were about 70% for values de affluent COD the order the 10.000 mg/l and percentage the methane in the gas the 63%, data these that indicate the viability the termophilic treatment of vinasse in this reactor. Stick out it the nature the exploratory research in this stage the work being necessary the realization the complementary stage aiming at optimize the hydraulic detention time and the maxim organic load to be utilized. How a preliminary study the results were satisfactory.

Key words: anaerobic process, vinasse, termophilic conditions, adaptation of anaerobic sludge.

1. INTRODUÇÃO

O principal objetivo do programa Proálcool - Programa Nacional do Álcool, criado em 1975, foi o de diminuir a dependência externa do país com relação ao petróleo, principal fonte de combustível para veículos automotores. Não sendo auto-suficiente na produção de petróleo, o programa visou a ampliação da matriz energética do Brasil, através da produção extensiva de álcool. Adicionalmente, obteve-se a redução da poluição do ar, devido ao uso do álcool em substituição ao petróleo nos motores dos veículos.

Algumas das destilarias de álcool têm capacidade de produção de mais de um milhão de litros por dia e uma destilaria de médio porte produz cerca de 120.000 litros por dia, durante seis meses ao ano, sendo que 24.000 m³ de álcool são produzidos anualmente, requerendo-se, para tanto, 360.000 toneladas de cana. Essa produção de álcool gera 288.000 m³ de vinhaça, cuja carga orgânica total, expressa como demanda química de oxigênio (DQO), é de 12.960 toneladas por ano, correspondendo à população equivalente de 300.000 habitantes. Para a produção de 13 bilhões de litros de álcool, a carga orgânica total desta atividade é equivalente a 160.000.000 de habitantes, maior que a população atual do país (VAN HAANDEL et al, 1994).

Dados mais atuais de produção de vinhaça foram obtidos na página de internet da Empresa Santa Elisa, referentes à safra de 97, com início em 07/04/97 e término em 19/12/97. A quantidade de cana esmagada foi de 5.500.000 toneladas, resultando em 6.000.000 sacas de 50 kg de açúcar produzido, além de 280.000.000 de litros de álcool. Ressalta-se que, somente na região de Ribeirão Preto, foram produzidos 3,9 bilhões de litros de álcool, o que equivale a 28% da produção nacional.

Na produção do álcool ocorre a geração de alguns subprodutos, prejudiciais ao meio ambiente. Um subproduto altamente prejudicial é a vinhaça, que é gerada pelas indústrias alcooleiras, destilarias e usinas de açúcar. Estima-se que, para cada litro de álcool produzido, sejam gerados 12,0 litros de vinhaça. A produção brasileira atual é de cerca de 13 bilhões de litros por ano (VAN HAANDEL et al., 1994).

A vinhaça possui diversas denominações regionais, como: caldos, restilo, vinhoto, vinhote, tiborna, caxixi e garapão.

Este subproduto possui características próprias que impedem que seja lançado no meio ambiente sem tratamento. Vários métodos de tratamento foram estudados visando estabelecer qual o mais adequado para a vinhaça. Inicialmente, eram utilizados tanques de evaporação e sedimentação e disposição no solo, especialmente em locais onde a topografia é favorável. Essa prática tem sido amplamente empregada e é responsável pela redução significativa dos problemas de poluição das águas superficiais nos locais em que tem sido adotada. Apesar de seu alto valor energético, a vinhaça atualmente tem um valor econômico negativo e sua disposição inadequada no meio ambiente causa problemas significativos.

Estudos quanto à biodegradabilidade da vinhaça mostraram a viabilidade do tratamento biológico por meio de reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente. Primeiramente, estes foram operados na faixa de temperatura mesofílica com resultados satisfatórios. SOUZA, (1991), operou um reator UASB (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket), na Usina São Martinho, na temperatura termofílica, obtendo valores de eficiência de remoção de matéria orgânica superiores aos obtidos com reatores operados na temperatura mesofílica. Como vantagem adicional, a vinhaça não precisaria mais ser totalmente resfriada antes do seu tratamento, pois a temperatura elevada da vinhaça favorece o tratamento termofílico.

Este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade do tratamento anaeróbio termofílico no reator RAHLF, uma nova concepção de reator que está sendo testado no tratamento de vários efluentes. Até o momento, o reator em questão foi operado somente na faixa de temperatura mesofílica.

Em vista dos resultados obtidos quanto à eficiência do reator nos efluentes testados, desde esgoto sanitário até águas residuárias contendo PCP (pentaclorofenol), um teste excelente seria variar a temperatura utilizada, de mesofílica para termofílica. Para isso, escolheu-se a vinhaça como efluente a ser tratado, a qual é produzida e descartada a temperaturas elevadas, sendo, por esse motivo, conveniente verificar-se a aplicabilidade do tratamento sob condições termofílicas. Por outro lado, a vinhaça é abundante na região e, até o presente momento, não é tratada adequadamente na maioria das usinas, devido ao alto custo de tratamento e ao desconhecimento de técnicas de baixo custo para aproveitamento dos subprodutos, dentre os quais o gás metano.

2 . OBJETIVOS

- Avaliar o potencial de uso do Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo (RAHLF) no tratamento da vinhaça sob condições termofílicas, a partir de lodo mesofílico;
- Avaliação da variação da biomassa aderida à espuma de poliuretano submetida a aumento progressivo de temperatura passando da mesofílica para a termofílica.

3 . REVISÃO DA LITERATURA

3.1 - A Vinhaça.

Segundo CRUZ (1991), a vinhaça causa problemas de insalubridade, tem mau cheiro devido à formação de gases decorrentes da decomposição anaeróbia, confere gosto à água e turbidez. Sua cor é parda clara logo após ser produzida nas usinas e destilarias, tornando-se mais escura após sofrer o processo de oxidação, quando em contato com o ar. Possui alto teor de nutrientes, tais como potássio e cálcio. Sua concentração orgânica média, expressa em DQO, é de 45.000 mg/l; sua temperatura, ao ser produzida, se encontra na faixa de 80 a 100°C, apresentando pH ácido, em torno de 4 a 5. As principais características da vinhaça estão apresentadas na Tabela 1. Foram desenvolvidas técnicas de tratamento da vinhaça usando os processos biológicos, a digestão anaeróbia, onde nutrientes são utilizados pela microbiota para a oxidação da matéria orgânica. Caso estes nutrientes não se encontrem no efluente de acordo com a relação estipulada como sendo a ideal para o processo, estes nutrientes devem ser adicionados ao efluente a ser tratado, obedecendo a relação de DQO:N:P (Demanda Química de Oxigênio: Nitrogênio: Fósforo) sendo que a relação utilizada na degradação anaeróbia é de 500:5:1 (VIEIRA, 1981).

As unidades de tratamento biológico promovem o crescimento e a retenção de biomassa no sistema, permitindo que as reações bioquímicas de estabilização da matéria orgânica ocorram no menor tempo possível, removendo as substâncias dissolvidas da fase líquida. Essas unidades produzem excesso de lodo biológico, que deve ser desidratado e adequadamente disposto.

As características químicas, físicas e físico-químicas da vinhaça "in natura", podem oscilar ao longo de um dia, numa mesma usina, dependendo da matéria-prima e das condições operacionais da usina, do mosto utilizado na fermentação e da operação de destilação. Estas variações são ainda mais acentuadas, quando se compara a composição de vinhaças procedentes de várias usinas e destilarias, operando com o mesmo tipo de matéria-prima. Além disso, a adição, à vinhaça, de outras correntes de águas residuárias procedentes do processo produtivo de álcool e açúcar, também alteram significativamente as suas características qualitativas e quantitativas (CENTURIÓN, 1983).

Inicialmente, como alternativas de descarte direto da vinhaça nos corpos receptores, eram utilizadas as seguintes técnicas: reciclagem, aplicação direta no solo, aplicação da vinhaça "in natura" na lavoura, concentração e combustão, produção da proteína celular, emprego, como complemento, de rações animais, tratamentos físico-químicos e digestão anaeróbia (CENTURIÓN, 1983).

A reciclagem da vinhaça reduz, obviamente, o volume do despejo a ser tratado, podendo haver, por decantação intermediária, a remoção de uma parte dos constituintes sólidos orgânicos e inorgânicos, diminuindo a carga poluidora. Alguns autores citam a possibilidade do uso de uma parte do restilo na lavagem da cana, na entrada do processo industrial. Ela também pode compor uma parte da água de diluição do melaço, durante um certo número de ciclos, economizando-se nutrientes e reduzindo a vazão de efluentes (CENTURIÓN, 1983).

A prática de disposição controlada de vinhaça no solo, como parte da água de irrigação com fertilizante, produziria: a) melhoria das propriedades físicas e químicas do solo; b) elevação do seu pH, neutralizando ou alcalinizando o solo; c) aumento do poder de retenção de água; d) aumento das características de retenção de sais minerais; e) restauração, conservação ou aumento da fertilidade (por inclusão de matéria orgânica); f) aumento da microflora; g) produção de condições ideais para cultivo de cana. Deve-se levar em conta que as taxas ótimas de aplicação são funções do tipo de solos e sua fertilidade. Taxas elevadas levam a efeitos indesejáveis, citando-se: comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, poluição do lençol freático, salinização do solo, etc (CENTURIÓN, 1983).

Os meios de aplicação "in natura", denominados unidades móveis motorizadas, usualmente empregadas em nosso país, são constituídos de sistemas de espargimento, formados por frotas de caminhões-tanque de "queda-livre" ou acionadas por tomadas de força do cavalo. Além desses tipos, existe também o sistema de irrigação por sulcos ou por aspersão por canhão hidráulico (CENTURIÓN, 1983).

A vinhaça pode sofrer processo de evaporação, com o objetivo de diminuir seu volume inicial e facilitar seu manuseio, aproveitando-se sobras de energia na destilaria ou usina. O restilo concentrado vai, então, ter utilização como fertilizante, complemento de ração mineral, ou até ser incinerado, visando uma possível recuperação de sais de potássio. Essa técnica não tem sido muito utilizada no Brasil, por ter se mostrado antieconômica. No emprego como fertilizante, há de se considerar

a vantagem de facilidades devido ao menor volume, contrabalançadas com problemas de: viscosidade maior no bombeamento, dificuldade de incorporação ao solo, impossibilidade de aplicação por sistemas de sulcos e canais a não ser por rediluição. Por fim, as águas condensadas da evaporação, de DBO considerável, devem ser tratadas ou dispostas de acordo com as práticas atuais (CENTURIÓN, 1983).

A utilização da vinhaça como substrato para crescimento microbiano tem se tornado importante e a biomassa pode atingir preços compensadores no mercado, apesar de existirem limitações relativas a custo de transporte, dificuldades de manutenção do grau de umidade do produto durante o armazenamento, preferência de consumo próximo à destilaria, etc. Ressalta-se que o efluente resultante dessa segunda fermentação para obtenção de proteína celular, ainda contém DBO elevada, não podendo ser descartado em corpos d'água, sem que antes sofra tratamento ou destino adequado (CENTURIÓN, 1983).

O emprego da vinhaça concentrada a 60⁰ Brix na formulação de ração animal apresenta dificuldades de transporte e manuseio. Apresenta efeitos laxativos para o gado, apesar de incrementar a produção do leite (CENTURIÓN, 1983).

Experimentos de tratamento físico-químico têm tido pouco sucesso, na opinião de autores estrangeiros. A sedimentação tem sido insatisfatória, mesmo com a adição de coagulante e outros aditivos como sulfato de alumínio, cal, cloreto de ferro e outros. Além disso, o sedimentado entra em fermentação anaeróbia e produz maus odores. Registram-se, ainda, estudos sobre o uso de osmose reversa, eletrofloculação, eletrodialise, eletrosmose, mas com custos muito elevados e grau de tratamento muito limitado (CENTURIÓN, 1983).

Até recentemente, a vinhaça era lançada diretamente nos rios e, devido às suas características, causava a poluição das águas, com conseqüente morte de peixes e outros animais aquáticos, como sapos e crustáceos. Causava ainda a morte da microfauna, microflora, plantas aquáticas e submersas. Em vista disso, foi proibido o lançamento da vinhaça nos rios, surgindo a necessidade de implantar métodos de tratamento deste efluente (SATTO, 1994).

Tabela 1 - Características da vinhaça resultante de mostos de caldo de cana e de mostos mistos de caldo (proveniente da moagem da cana) e melaço (efluente proveniente do processo de fabricação do açúcar).

Características	Mosto de Caldo	Mosto Misto
pH	3.7-4.6	4.1-4.6
Temperatura (°C)	80.0-100.0	80.0-100.0
DBO (g/l)	6.0-16.5	19.8
DQO (g/l)	15.0-33.0	45.0
ST (g/l)	23.7	52.7
SV (g/l)	20.0	40.0
SF (g/l)	3.7	12.7
Nitrogênio (g/lN)	0.15-0.70	0.46-0.71
Fósforo (g/l)	0.01-0.21	0.09-0.24
Potássio (g/l)	1.2-2.1	3.06-4.60
Cálcio (g/l)	0.13-1.54	1.18-4.60
Magnésio (g/l)	0.20-0.49	0.53-0.70
Sulfato (g/l)	0.60-1.32	2.67-3.73
Carbono (g/l)	5.7-13.4	8.7-12.1
Relação C/N	19.7-21.1	16.4-16.43
Matéria Orgânica (g/l)	19.5	38.0
Substâncias Redutoras (g/l)	7.9	8.3

Fonte: VAZOLLER, 1995.

3.2 - O Processo de Digestão Anaeróbia.

A digestão anaeróbia é um dos processos mais antigos utilizado para a estabilização de lodos. Ela envolve a decomposição de matéria orgânica e oxidação da matéria inorgânica na ausência de oxigênio molecular. As maiores aplicações têm sido na estabilização de lodos concentrados no tratamento de águas residuárias e de alguns resíduos industriais. Mais recentemente tem sido demonstrado que resíduos diluídos também podem ser tratados anaerobiamente.

De maneira geral, a Figura 1 mostra a primeira etapa, onde ocorre a hidrólise e a fermentação de compostos orgânicos complexos com formação de compostos mais simples, envolvendo as bactérias hidrolíticas fermentativas, a segunda etapa onde ácidos orgânicos e H_2 são formados por um grupo de bactérias chamadas acetogênicas; e a etapa terminal, na qual os microrganismos metanogênicos, utilizam o H_2 produzido nas outras etapas para reduzir CO_2 a CH_4 e H_2O ou descarboxilam o acetato para CO_2 e CH_4 (VAZOLLER, 1991).

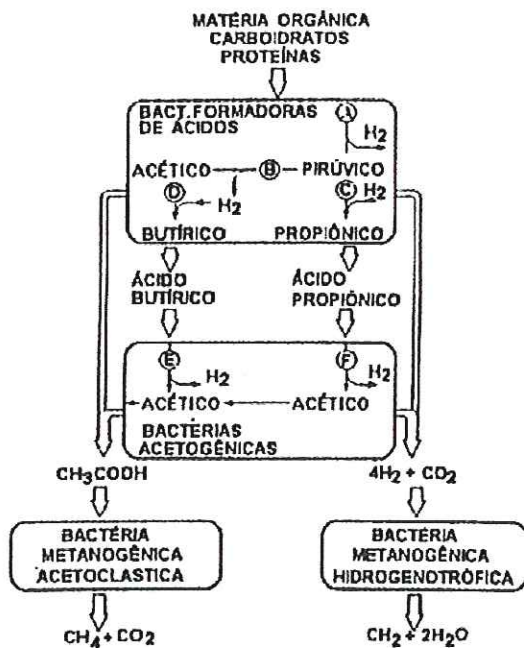


Figura 1 - Relações Metabólicas no Processo Anaeróbico.

Fonte: VAZOLLER, 1991.

É importante afirmar que a estabilidade do processo é reflexo das interações de espécies bacterianas que promovem as condições ótimas para o metabolismo anaeróbico. Portanto, a formação de produtos por um determinado grupo bacteriano é regulada pela utilização destes produtos por outro grupo de bactérias.

No ambiente anaeróbico complexo e misto, tem sido destacado o papel dos microrganismos na regulação do teor de H_2 no meio, uma vez que a fermentação é afetada em duas etapas principais quando os teores de H_2 são mantidos altos. A primeira etapa que pode ser afetada é a fermentativa, produzindo menos acetato, CO_2 e H_2 e mais produtos reduzidos como propionato, butirato e etanol, por desvio de fluxo de elétrons do NADH. Na segunda etapa, as bactérias acetogênicas passam a ser

incapazes de produzir H_2 e cessam o catabolismo de compostos reduzidos, tais como propionato e butirato, para acetato. Sob essas condições, não ocorre completa degradação, havendo acúmulo de produtos reduzidos, não gasosos e ácidos, mantendo-se a mesma quantidade de matéria original no processo, ocorrendo queda no pH. Com a queda no pH, ocorre a inibição dos microrganismos metanogênicos, com posterior colapso no reator (VAZOLLER, 1991).

Desta forma, pode-se verificar o importante papel dos microrganismos metanogênicos utilizadores de H_2 na manutenção dos baixos níveis de H_2 no processo, criando condições termodinamicamente favoráveis para o catabolismo de compostos de vários carbonos pelas bactérias acetogênicas.

Todos os processos de crescimento de microrganismos são dependentes de reações químicas e as velocidades destas reações são influenciadas pela temperatura. A temperatura é um dos fatores ambientais que influenciam o crescimento e a sobrevivência de qualquer organismo. Os microrganismos que crescem em temperaturas elevadas apresentam características metabólicas que promovem reações celulares catalizadas ou não por enzimas, geralmente mais rápidas e, portanto, as velocidades de crescimento destas células em seu meio são aumentadas. A uma certa temperatura, proteínas, ácidos nucleicos, enzimas e outros componentes celulares são sensíveis, podendo ser irreversivelmente desnaturados (BROCK, 1994).

Todo o organismo vivo possui uma temperatura mínima para o seu crescimento, abaixo da qual não se desenvolve; uma temperatura ótima, na qual o seu crescimento é mais rápido; e uma máxima, acima da qual o seu crescimento não é possível (BROCK, 1994).

Baseadas nas faixas de temperatura nas quais as bactérias proliferam, elas podem ser classificadas em psicofílicas, mesofílicas e termofílica. Na Tabela 2, observa-se a faixa de temperatura indicando aproximadamente a temperatura ótima, na qual ocorre um crescimento mais rápido durante um curto período de tempo (12 a 24 horas). Em suas respectivas classes, termófilas facultativas e psicrófilas facultativas são bactérias que têm temperatura ótima que se estende dentro da faixa mesófila.

Tabela 2 - Definição dos microrganismos de acordo com suas temperaturas cardinais de crescimento.

Grupos	T mínima (°C)	T ótima (°C)	T máxima (°C)
Psicrófilos	<0	<15	<20
Mesófilos tolerantes	>5	>15	>20
Mesófilos	>5	>15	>20
Termotolerantes	(?)	<45	>50
Termófilos tolerantes	<25	>45	>50
Termófilos	>25	>45	>50
Termófilos tolerantes extremos	<45	>65	>70
Termófilos extremos	>45	>65	>70
Barotermotolerantes	(?)	<100	>100
Barotermófilos	(?)	>100	>100

T (°C) = temperatura em graus centígrados (?) - limites desconhecidos

OBS: os microrganismos barófilos são capazes de suportar pressões de 0,1 a 40 MPa (Roberts, 1998).

Fonte: WIEGEL apud VAZZOLER (1995).

Segundo WIEGEL, apud VAZZOLER (1995), é provável que os microrganismos tolerantes possuam dois conjuntos enzimáticos, em que a síntese das enzimas é regulada pela temperatura, o que possibilitaria o crescimento das células em duas diferentes faixas de temperaturas.

De qualquer modo, é necessário enfatizar que nem todos os organismos de um grupo são capazes de crescer perto do limite superior para este mesmo grupo. Usualmente, somente algumas espécies ou gêneros são capazes de se desenvolver com sucesso perto do limite superior de temperatura.

Uma pergunta pode ser feita: Como os organismos podem sobreviver e crescer em altas temperaturas? Primeiro, suas enzimas e outras proteínas são muito mais estáveis ao calor do que as mesofílicas, e estas macromoléculas funcionam otimamente em altas temperaturas. Como é realizada a estabilização ao calor? Estudos das enzimas termofílicas tem mostrado que elas diferem muito pouco na seqüência de aminoácidos para a mesma enzima em mesófilos. Parece que a substituição crítica de aminoácidos em um ou mais locais na enzima permite duplicar em diferentes

caminhos e ocorrem efeitos de resistência ao calor. Na adição, a maquinaria de síntese de proteínas (tais como: ribossomos e outros constituintes) dos termófilos, bem como estruturas tais como a membrana citoplasmática, são igualmente estáveis ao calor. Termófilos apresentam membranas de lipídeos ricos em ácidos graxos saturados, permitindo que a membrana permaneça estável e funcionando a altas temperaturas (BROCK, 1994).

Uma das grandes curiosidades em relação ao comportamento dos termófilos reside na compreensão da estabilidade de suas moléculas e estruturas celulares frente às altas temperaturas em que vivem. RUSSEL & FUKUNAGA apud VAZOLLER (1995), relataram que uma das mais importantes adaptações dos termófilos está na composição lipídica das membranas. Tem-se especulado que o elevado conteúdo de glicolipídios aumenta a capacidade de ligações de hidrogênio nas camadas da membrana celular, estabilizando-a sob altas temperaturas através de interações adicionais com componentes externos da parede celular.

Os autores RUSSEL & FUKUNAG apud VAZOLLER (1995), descreveram um aspecto interessante em relação às arqueobactérias metanogênicas termofílicas, que possuem di-éteres e tetra-éteres nos lipídios das membranas celulares. No gênero *Methanobacterium* spp, com crescimento ótimo a temperatura de 65°C, foram determinadas iguais quantidades dos dois tipos de lipídeos, ao passo que, no gênero *Methanothermus* spp, que se desenvolve bem à temperatura de 85°C, o conteúdo de tetra-éteres nos lipídios foi de 80 a 90%. Provavelmente esta camada lipídica auxilia na estabilidade da membrana termofílica.

A análise dos tempos de geração dos termofílicos também constitui um aspecto importante na compreensão da estabilidade do metabolismo bacteriano a temperaturas elevadas. Em muitos casos, as velocidades de crescimento dos termófilos são similares às dos mesofílicos, e em outros distintamente mais rápidas. Consideradas as diferenças de temperaturas de crescimento dos dois tipos de bactérias, observa-se que os termofílicos não crescem tão efetivamente como diagnosticado pela teoria. Evidentemente, a teoria que se aplica para reações químicas quaisquer não pode ser integralmente extrapolada para o crescimento bacteriano, que está limitado pela capacidade de reação de suas enzimas. Ao que tudo indica, as enzimas dos termofílicos apenas suportam as elevadas temperaturas a que estão submetidas e esta aparente perda de eficiência é o preço que as bactérias termofílicas

pagam para viverem em habitats com menor concorrência (SUDARAM apud VAZOLLER, 1995).

Os termófilos oferecem vantagens nos processos biotecnológicos, muitos dos quais podem se realizar mais rápida e eficientemente em altas temperaturas. O acréscimo na temperatura provoca aumento na razão de difusão e solubilidade de compostos não gasosos e tende para a eliminação da contaminação microbiana. Utilizar processos microbianos a altas temperaturas pode eliminar ou reduzir o custo de resfriamento, o que pode ser uma parte significativa do custo total do processo em baixas temperaturas.

A produção de combustíveis e compostos químicos pela fermentação termofílica é exclusivamente baseada na disponibilidade de carboidratos obtidos a partir de vegetais, com taxas razoáveis de fermentação. Por exemplo, a massa celulósica derivada de pedaços de madeira e resíduos agropecuários, urbanos e de indústrias de papel, tem sido usada como fonte de matéria-prima a ser transformada em alguma forma de energia, como o etanol, por microrganismos termofílicos (WEIMER apud VAZOLLER, 1995).

Apesar de seu grande potencial na área industrial, os microrganismos termofílicos têm sido pouco explorados. Algumas justificativas para esta situação se encontram: - na ausência do conhecimento de variáveis físicas e químicas no projeto e operação de um reator termofílico; - no pequeno conhecimento das estruturas metabólicas dos organismos termofílicos; - na necessidade do aquecimento dos sistemas; - nos danos mais freqüentes em reatores, como corrosão; - na resistência das culturas aos mecanismos de esterilização; - nos baixos rendimentos enzimáticos (WEIMER, LOWE apud VAZOLLER, 1995).

As dificuldades inerentes à tecnologia dos processos termofílicos tendem a ser superadas mediante as vantagens inerentes ao processo, como: a otimização no rendimento dos sistemas operados em altas temperaturas pode ocorrer mediante a diminuição da viscosidade do meio, que altera a transferência de massa na fermentação, facilitando-a, e assim, reduzindo o custo de agitação do reator, diminuição da solubilidade dos gases.

3.3 - Adaptação do Lodo Mesofílico para Termofílico.

Para dar a partida em reatores operando na faixa de temperatura termofílica faz-se necessário a utilização de um inóculo termófilo. Quando não se possui tal inóculo pode-se adaptar o lodo de reatores operando em faixa de temperatura mesofílica ou utilizando-se rúmen de bovinos. Tais processos foram utilizados em diversos experimentos realizados com vários tipos de efluentes.

Trabalhos publicados indicam que o tempo de adaptação de inóculo mesofílico para as condições termofílicas é em torno de 30 a 40 dias e, em alguns casos, pode levar cerca de 2 a 3 meses. Muitos trabalhos utilizaram a mistura de lodo mesofílico com rúmen fresco, o qual é o "habitat" natural dos microrganismos anaeróbios. Nessa mistura, inicialmente tem-se a presença de poucos organismos termofílicos e ao se proporcionarem as condições de temperatura ideais, eles se desenvolverão realizando a conversão da matéria orgânica em metano e gás carbônico.

Segundo FANG et al. (1996), vários tipos de lodos mesofílicos podem ser utilizados como inóculos de reatores UASB operados na faixa de temperatura termofílica. Imediatamente após o aumento da temperatura para 55 °C, em todos os reatores utilizados no experimento, observou-se a remoção de DQO. Os resultados menos favoráveis foram apresentados em reatores utilizando lodo floculento, que requer tempo maior para seu desenvolvimento, enquanto que, nos reatores que utilizaram lodo granulado, foram obtidas porcentagens mais elevadas de remoção de DQO e menor tempo de desenvolvimento. Todos os reatores foram inoculados com lodos mesofílicos, sendo que os lodos utilizados foram: lodo floculento, lodo granulado de reator UASB e lodo de grânulos desintegrados.

MENDEZ et al. (1995), utilizaram filtros anaeróbios termofílicos, para o tratamento de águas residuárias de unidades de processamento de alimentos marinhos enlatados. A elevada salinidade é uma das razões pela qual essas águas não são tratadas por processos biológicos, pois o Na^+ é considerado altamente inibidor sob condições normais de operação impostas pelas concentrações de Na^+ e/ou Cl^- destas águas residuárias. O inóculo utilizado, na partida do filtro, originou-se de reator UASB mesofílico tratando água residuária de uma indústria de açúcar. Os resultados obtidos mostram a possibilidade de sucesso no tratamento anaeróbio de águas residuárias com alta salinidade.

Nos estudos de AHRING (1994), 4 plantas para digestão de resíduos industriais orgânicos foram construídas para produção de biogás em larga escala. As plantas termófilas tratam mais de 450 toneladas de material orgânico por dia e são operadas entre 52 a 56°C. O inóculo utilizado para a partida das plantas termofílicas foi o lodo proveniente das plantas mesofílicas misturado com rúmen. Estas experiências mostraram que as plantas termofílicas não são menos estáveis do que as mesofílicas. O tempo de partida para a primeira planta termofílica foi longo, superior a um ano, antes da produção de gás chegar a valor da ordem de 9 N.m³ gas/ m³.r.dia. O maior problema na partida dos reatores termofílicos é o baixo número de microrganismos termofílicos em materiais orgânicos de diferentes tipos de resíduos. O problema das baixas populações microbianas pode ser resolvido quando é avaliado para plantas termofílicas já existentes.

3.4 - Tratamento Biológico da Vinhaça.

As estações de tratamento de efluentes utilizando a digestão anaeróbia, como forma de tratamento, em sua grande maioria, são operados na faixa de temperatura mesofílica, ou seja, em torno de 38°C, já que as temperaturas típicas tropicais facilitam sobremaneira a fermentação anaeróbia. Entretanto, as elevadas temperaturas da vinhaça, estimularam o estudo sobre a biodigestão termofílica, cuja temperatura do processo é em torno de 55°C, em reator de fluxo ascendente e manta de lodo. Os resultados obtidos nestes reatores no tratamento termofílico da vinhaça apresentaram alta eficiência, podendo assegurar o sucesso deste processo na estabilização da vinhaça (VAZZOLER, 1995).

A viabilidade do tratamento anaeróbio da vinhaça no Brasil foi comprovada com o uso de reatores anaeróbios de fluxo ascendente e de manta de lodo mesofílicos, embora a digestão anaeróbia mesofílica da vinhaça, tenha um balanço econômico desfavorável. Surge, então, como alternativa, o estudo da biodigestão anaeróbia termofílica da vinhaça (VAZZOLER, 1995).

Considerando a elevada temperatura da vinhaça e as vantagens do processo termofílico, a Usina São Martinho, a maior produtora de álcool do Brasil (3,4 x 10⁸ l/ano), decidiu desenvolver, com assistência da Biometano, a digestão anaeróbia

termofílica da vinhaça em reator UASB. O objetivo foi a duplicação da carga orgânica máxima aplicada no processo mesofílico, (consequentemente, reduzindo o volume total do reator necessário na destilaria, de 40.000 para 20.000 m³) e diminuindo os custos com resfriamento da vinhaça (SOUZA, 1991).

O volume do reator utilizado era de 75 m³, a vinhaça foi gerada a temperatura de 90°C. Foram obtidos resultados satisfatórios com cargas orgânicas de 25 a 30 kg DQO/m³ de reator.dia, sendo a remoção da DQO de 72% e a produção de 10 N.m³ de biogás/m³ de reator.dia, com 60% de metano. O inóculo consistiu na mistura de lodo de esgoto em digestão mesófilo e estrume bovino, com quantidades totais, respectivamente, de 1200 kg e 100 kg de sólidos em suspensão voláteis (SSV). A temperatura do sistema era da ordem de 56±2°C. O tempo de detenção hidráulico foi de 10,8 horas. Foi necessária a adição de nutrientes como uréia e fósforo na vinhaça. A atividade metanogênica do lodo na mistura dos ácidos acético, butírico e propiônico, foi de 2,14 kg CH₄.DQO/kg de SSV.dia, e a concentração final de lodo no reator foi suficientemente baixa para supor que cargas orgânicas superiores poderiam ser aplicadas (SOUZA, 1991).

Tendo em vista a aplicabilidade do tratamento anaeróbio termofílico da vinhaça em reatores de manta de lodo e fluxo ascendente, este trabalho irá verificar a eficiência do mesmo tratamento, em um reator de configuração diferente do acima citado, observando o seu comportamento. O reator a ser utilizado é o RAHLF - Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo, o qual está sendo testado no tratamento de diferentes águas residuárias em temperaturas mesofílicas, apresentando altas eficiências de remoção da carga orgânica e produção de metano.

3.5 - Características do Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo.

Neste trabalho será utilizado o Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo (RAHLF), o qual foi concebido no Laboratório de Processos Biológicos (LPB) durante a vigência de Projeto Temático da FAPESP e testado inicialmente no tratamento de águas residuárias de uma indústria de papel reciclado com excelentes resultados (FORESTI et al., 1994).

Esse novo tipo de reator anaeróbio foi concebido objetivando o aumento da relação: volume útil/volume total, através da diminuição do volume destinado à separação gás/sólido/líquido e obtenção de regime de escoamento próximo ao pistonado, permitindo melhor compreensão dos fenômenos bioquímicos em seu interior, e a obtenção de parâmetros racionais para simulação, otimização e aumento seguro de escala (ZAIAT, 1996).

Esses são os aspectos essenciais do desenvolvimento da biotecnologia de processos anaeróbios de tratamento de águas residuárias, uma vez que a maioria das configurações de reatores anaeróbios em uso utiliza parâmetros de projeto empíricos e não dispõe de critérios seguros de aumento de escala.

Vários estudos foram desenvolvidos neste reator para analisar os fundamentos dos processos e sua aplicação tecnológica, sendo eles: avaliação preliminar de desempenho, caracterização hidrodinâmica, cinética e transferência de massa. Cada uma das pesquisas apresentou métodos e técnicas inovadoras.

Para início dos trabalhos, definiu-se a metodologia para imobilização da microbiota (biomassa), a qual consistiu em colocar a espuma de poliuretano (suporte) e o lodo (macerado) em um recipiente permitindo o contato entre o lodo e a espuma pôr um período mínimo de 2 horas e sendo aconselhável deixar por cerca de 12 horas. Após, as matrizes com as células aderidas foram colocadas em um meio (o mesmo utilizado no experimento para adaptar a microbiota ao meio) para lavagem dos sólidos fracamente aderidos. Esgotou-se então o meio e o inóculo estava pronto para ser colocado no reator. Em escala maior este procedimento deverá ser realizado no interior do próprio reator (ZAIAT, 1996).

Como avaliação preliminar do desempenho do RAHLF, lodo proveniente de reator UASB tratando efluente de indústria de papel reciclado foi imobilizado em cubos de espuma de poliuretano com densidade de 20 kg/m^3 seguindo metodologia desenvolvida anteriormente. Encheu-se o reator com as biopartículas e deu-se início ao experimento utilizando-se águas residuárias de indústria de papel reciclado enriquecida com fontes de nitrogênio e fósforo e com adição de bicarbonato de sódio. Fixou-se a vazão para obtenção de tempo de residência de, aproximadamente, 23 horas e carga orgânica na faixa de $2 \text{ Kg DQO/m}^3 \text{ dia}$ (FORESTI et al., 1995).

A eficiência de remoção de DQO foi satisfatória, apresentando valor médio de 82% à partir do oitavo dia de operação, tendo sido 75% e 86% os valores mínimo e máximo obtidos.

A partir do oitavo dia o biorreator apresentou estabilidade na operação com o aumento da eficiência de remoção de DQO.

Não foi observado o arraste dos microrganismos durante a operação do reator, o que demonstra que a carga hidráulica aplicada de $1 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ d}$ é inferior à máxima aplicável. Isto pôde ser verificado pelos dados de sólidos em suspensão voláteis (SSV) com valor médio de 255 mg/l no afluente e 93 mg/l no efluente do reator.

A concentração de ácidos voláteis totais (AVT), atingindo níveis elevados no afluente, apresentou valores altos no efluente até, aproximadamente, o décimo dia de operação. À partir deste dia, houve queda na concentração de AVT no efluente atingindo valores próximos de zero. O pH, bem como a alcalinidade à bicarbonato no efluente do reator se mantiveram estáveis. O pH apresentou valores médios de 7,6 no afluente e 7,9 no efluente enquanto que a alcalinidade à bicarbonato atingiu, no afluente e efluente, valores de 784 e 1200 mg CaCO_3/l respectivamente.

Os dados demonstram que houve, no sistema, um equilíbrio entre as populações de microrganismos redutores de sulfato e metanogênicos. A concentração de sulfato na entrada do reator apresentou valor médio de 137 mg/l e na saída, um valor de 46 mg/l.

A produção média de gás foi de 1080 ml/dia com 79% de metano no gás, resultando em uma produção de $0,32 \text{ l CH}_4/\text{g DQO}_{\text{Removida}}$. Este valor representa 76% do valor teórico devido, principalmente, à geração de H_2S pelas reductoras de sulfato.

Os ensaios para avaliação do efeito da velocidade superficial de líquido (v_s) sobre o arraste de lodo do suporte foram realizados utilizando-se um tubo de 10 ml e 1,5 cm de diâmetro para permitir a obtenção de altas v_s . As matrizes contendo lodo imobilizado foram colocadas no tubo e água foi bombeada à partir de um reservatório através de bomba peristáltica, submetendo o leito de biopartículas a 8 v_s diferentes por um período de 15 minutos cada (ZAIAT et al., 1996).

O efluente do tubo foi coletado para análise de concentração de sólidos em suspensão totais (SST) e sólidos em suspensão voláteis (SSV), permitindo a avaliação do arraste de sólidos para cada v_s aplicada. No final do experimento, as matrizes de

espuma de poliuretano foram lavadas com 100 ml de água destilada para avaliação dos sólidos imobilizados remanescentes.

A v_s aplicada foi aumentada gradualmente de 0,30 cm/s até 2,21 cm/s e foram obtidos valores acumulados de massa de SST e SSV arrastada da espuma para cada v_s . Finalmente, determinou-se a porcentagem de massa arrastada para cada v_s aplicada utilizando-se valores de ST e SSV aderidos e arrastados.

Os resultados apresentaram um arraste significativo de SST para a v_s inicial (0,30 cm/s). Este resultado indica a presença de uma fração de sólidos fracamente aderidos ao suporte. Parte destes sólidos se desprenderam, provavelmente, no processo de enchimento do tubo.

A taxa de arraste de SST decresceu, continuamente, a partir de v_s de 0,83 cm/s até 1,97 cm/s. Entretanto, o arraste total de ST foi considerável (23,2%).

O arraste de SSV não foi significativo até v_s de 0,83 cm/s. No entanto, não foi detectado arraste a partir deste valor de v_s até 1,66 cm/s. Um maior arraste ocorreu em v_s de 1,66 cm/s e, novamente, não foram detectadas perdas de SSV para v_s superiores. A v_s de, aproximadamente, 1,5 cm/s parece ser crítica para "lavagem" de células da espuma de poliuretano. No entanto, o arraste de SSV não foi considerável para a faixa de v_s aplicada.

A diferença entre os arrastes de SST e SSV indica que o arraste é seletivo e deve ser melhor investigado no futuro. Talvez parte da fração inerte do lodo anaeróbio permaneça retida nos poros do suporte por simples "aprisionamento" e as células desenvolvam algum tipo de ligação química com o material suporte. O efeito deste arraste seletivo sobre o processo bioquímico como um todo deve ser esclarecido a fim de prevenir problemas operacionais.

Entretanto, deve ser esclarecido que os valores de v_s aplicados ao leito de biopartículas foram mais de 20 vezes maiores que os aplicados ao RAHLF no ensaio preliminar de avaliação de desempenho.

Estudos de transferência de massa e cinética foram realizados em reator diferencial horizontal de 10 ml e comprimento de 1,5 cm recheado com as matrizes de espuma de poliuretano. 300 ml de uma solução de glicose com DQO de 228 mg/l foi bombeada de um tanque agitado para o reator, retornando ao tanque mantido a 5°C para minimizar a ocorrência de reações bioquímicas. Antes de entrar no reator a solução de glicose era aquecida até 30°C. As matrizes contendo lodo anaeróbio

imobilizado foram adaptadas na solução de glicose por três semanas antes do início dos experimentos (ZAIAT et al., 1997; ZAIAT et al., 1996; VIEIRA et al., 1997).

No reator diferencial foram aplicadas 6 vazões diferentes, permitido variação de velocidade superficial de líquido (v_s) de 0,007 a 0,075 cm/s. Cada experimento teve a duração de 10 horas e amostras foram coletadas a cada 2 horas para análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO) filtrada. Para cada v_s aplicada obteve-se o perfil de DQO com o tempo. Ao final dos experimentos as matrizes de espuma de poliuretano foram lavadas com água destilada para determinação da concentração de sólidos em suspensão voláteis (SSV).

Utilizando as relações matemáticas desenvolvidas para este fim, foram calculados os valores da velocidade específica da reação e com este pode-se calcular o k_{sa} para cada v_s aplicada.

Observou-se que k_{sa} aumenta quando se aumenta v_s aplicada, devido ao decréscimo da película de líquido estagnada ao redor das biopartículas. Portanto, à medida que se aumenta a velocidade superficial de líquido há uma diminuição na resistência externa à transferência de massa. No entanto, não foi obtida condição de mínima resistência para a faixa de v_s estudada pois o k_{sa} apresentou sempre tendência crescente.

Estes resultados mostram claramente que a velocidade superficial de líquido afeta a velocidade de reação e, conseqüentemente, o desempenho do reator.

Foram obtidos também os parâmetros cinéticos aparentes, isto é, parâmetros obtidos em condições de operação tais que as resistências à transferência de massa interferem nos valores obtidos. Através dos parâmetros aparentes e do número de Biot, pôde-se obter os parâmetros cinéticos intrínsecos por extrapolação até condição de resistência à transferência de massa desprezível. Os valores obtidos foram 0.330 mgDQO/mgSSV.h e 72 mgDQO/l para $r_{máx}$ e K_s respectivamente.

Outra metodologia foi testada para estimativa dos parâmetros cinéticos intrínsecos através de condições experimentais em que a resistência a transferência de massa pode ser desprezada. Os experimentos foram realizados em mesa rotativa com temperatura controlada (30°C) utilizando água residuária sintética contendo glicose como principal fonte de energia (614 mg DQO/l) e lodo anaeróbico imobilizado em matrizes cúbicas de espuma de poliuretano. Objetivando avaliar a condição de minimização da resistência à transferência de massa externa foram realizados 6 experimentos variando-se a rotação de 50 a 300 rpm. Cada ensaio teve duração de 10

horas, sendo utilizado 10 frascos erlenmeyers, em condições de anaerobiose, com 30 ml de substrato e 0,60 ml de pellets. A cada 2 horas foram retirados 2 frascos para análise de demanda química de oxigênio (DQO). Os perfis de concentração de substrato em função do tempo permitiram a avaliação do efeito da resistência à transferência de massa na fase líquida através das velocidades iniciais de reação obtidas. Para a minimização dos efeitos da resistência à transferência de massa interna foi empregado uma relação de 1,66 mgDQO/mgSSV na qual a velocidade de reação é a limitante do processo.

As condições de minimização das resistências à transferência de massa foram satisfeitas, porém foi observado o desprendimento das células imobilizadas. Através de análise em microscopia eletrônica de varredura foi constatado que as células se aderem na espuma na forma de grânulos, sendo assim estimados parâmetros cinéticos intrínsecos para sistema com grânulos em suspensão. Foi obtido uma velocidade máxima específica de consumo de substrato ($r_{máx}$) de 0,168 mg DQO/mgSSV.h e constante de saturação de substrato (K_s) de 408,35 mg DQO/l.

Nos estudos do comportamento hidrodinâmico, o leito do RAHLF foi preenchido com esferas de cerâmica porosa de, aproximadamente, 5 mm de diâmetro e 21% de porosidade, obtendo-se uma porosidade do leito de cerca de 40% (CABRAL et al., 1995).

Foram realizados ensaios simulando-se a produção de gás e variando-se as vazões de alimentação.

A metodologia utilizada nos ensaios experimentais consistiu, basicamente, em se injetar um pulso de 2 ml de Rodamina WT de concentração inicial (C_i) igual a $3,462 \times 10^4$ µg/l na entrada do reator e medir as concentrações na saída ao longo do tempo, em intervalos constantes de 10 minutos e até que as leituras acusassem zero, através de análise fluorométrica.

Os valores obtidos para o parâmetro N (número de Reatores CSTR em Série), do modelo de N-CSTR em série, foram consideravelmente elevados (aproximadamente 10), indicando que o escoamento no reator se aproxima bastante do tubular, uma vez que, quanto maior for o valor de N mais o escoamento será tido como “plug-flow”, pois a curva DTR (Distribuição do Tempo de Residência) torna-se mais simétrica, aproximando-se assim da curva DTR característica de reatores com escoamento tipo tubular.

Para o modelo de Dispersão de Pequena Intensidade, os valores do número de dispersão (D/UL), que mede a extensão da dispersão axial, podem ser considerados como uma quantidade intermediária de dispersão, indicando que o escoamento pode ser caracterizado como tubular com uma certa dispersão axial.

Apesar de os modelos teóricos se ajustarem bem aos pontos experimentais, há uma grande imprecisão nos valores dos parâmetros obtidos uma vez que a rodamina é um traçador com baixo peso molecular e, provavelmente, se difunde nos poros do recheio do reator. Para eliminar o efeito desta difusão efetiva nas curvas DTR, foi desenvolvida metodologia baseada na modificação das curvas DTR obtidas a partir da quantificação deste efeito difusivo. Os parâmetros obtidos após nova análise das curvas experimentais foram sensivelmente diferentes dos obtidos anteriormente, aproximando mais o escoamento do reator ao escoamento tubular ideal. Portanto, traçadores com baixo peso molecular devem ser utilizados com muita cautela em estudos hidrodinâmicos em reatores heterogêneos, pois o efeito de difusão efetiva pode modificar a curva resposta, gerando parâmetros pouco confiáveis para aplicação em modelos teóricos.

Novos estudos hidrodinâmicos estão sendo realizados utilizando-se dextrana azul, um traçador de alto peso molecular, possibilitando a obtenção de curvas DTR confiáveis.

Foram desenvolvidos estudos de transferência de massa intraparticular em biopartículas de bactérias anaeróbias imobilizadas em alginato de sódio. Através de experimentos em mesa rotativa e utilizando o método de colocação ortogonal como ferramenta matemático-computacional e método simplificado da “velocidade de penetração”, foram determinadas as difusividades efetivas de glicose, sacarose e acetato nas biopartículas. Os valores de difusividade efetiva, obtidos foram muito próximos aos valores de difusividade destas substâncias em água à diluição infinita. Isto se deve ao fato de que estas substâncias estão presentes em concentrações muito baixas em águas residuárias (VELA et al., 1995).

O estágio atual de desenvolvimento do RAHLF permite que se preveja sua utilização segura no tratamento de águas residuárias que apresentam baixa concentração de sólidos em suspensão e com utilização de bactérias mesofílicas. Entretanto, o estudo de tal reator no tratamento de variados resíduos se faz necessária para verificação e avaliação do seu potencial de utilização nas mais variadas condições.

A vinhaça é o principal resíduo líquido gerado nas destilarias de álcool, com uma carga orgânica média expressa em DQO de 45 g/l, e com temperaturas na faixa de 80 a 100°C . A produção de vinhaça no Brasil é cerca de $1,5 \times 10^{11}$ l/ano. A tecnologia da digestão anaeróbia revelou-se promissora e eficiente para o tratamento da vinhaça (VAZOLLER, 1995). Os bons resultados obtidos até o presente momento em ensaios com o RAHLF, além da boa capacidade de retenção de biomassa apresentada pela espuma de poliuretano, permitem avançar nos estudos neste tipo de reator. O estudo de tratamento de águas residuárias com altíssimas cargas orgânicas, como a vinhaça, sob condição termofílica representa um bom teste para real avaliação do potencial de utilização dessa nova configuração para obtenção de alta produtividade de gás metano.

4 . MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - Montagem e Descrição do Sistema de Tratamento.

O sistema experimental de tratamento de vinhaça em condições termofílicas utilizado na pesquisa constituiu-se de um reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) e demais acessórios, instalado em uma câmara especial provida de sistema de controle de temperatura. Esse sistema foi montado no Laboratório de Processos Biológicos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

A câmara foi construída em madeira, revestida de isopor, com 2 cm de espessura. Como suporte, foi construída uma mesa, também em madeira, sobre a qual foi colocada a câmara.

O sistema foi montado da forma descrita a seguir. O mesmo consiste em controlador de temperatura, o qual mantém a temperatura no interior da câmara em 55°C, aquecedor e ventilador. O sistema funcionou da seguinte forma: o sensor do controlador de temperatura foi colocado sobre o ventilador ligado, e ao registrar a diminuição da temperatura ligava o aquecedor até manter o sistema na temperatura desejada.

O reator RAHLF utilizado nos experimentos foi construído segundo especificações descritas em ZAIAT (1960). O reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) compreende um tubo de vidro de 1m de comprimento (L) e 0,05m de diâmetro (D), contendo, na parte superior, tomadas utilizadas para separação e coleta de gases. O esquema experimental é apresentado na Figura 2. O reator foi preenchido com matrizes cúbicas de espuma de poliuretano contendo lodo anaeróbio imobilizado de acordo com metodologia desenvolvida por ZAIAT et al. (1994), resultando em porosidade de leito de 0,4.

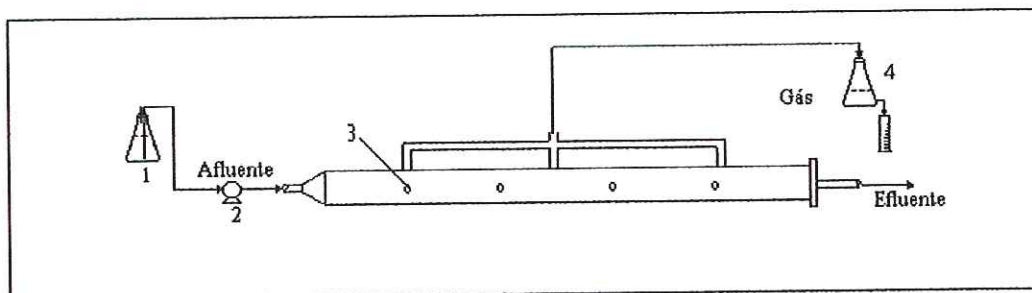


Figura 2 - Esquema de Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo (RAHLF) em escala de bancada. (1) Reservatório de substrato, (2) Bomba, (3) Amostradores, (4) Medidor de produção de gás (VIEIRA, 1996).

4.2 – Definição dos Parâmetros Operacionais.

O volume útil total do reator é de 1991 ml. O reator possui quatro pontos de coleta de amostras intermediários ao longo do seu comprimento e estes foram alocados em posições correspondentes às relações comprimento/diâmetro (L/D) de 4, 8, 12 e 16.

Inicialmente, realizou-se a calibração da bomba peristáltica marca Ismatec, utilizada no experimento. Para tal, foram realizadas medições do tempo necessário para bombear 1 ml de líquido, com a bomba trabalhando nas diferentes porcentagens de sua capacidade. Para cada porcentagem, foram realizadas 3 medições, adotando-se, para a curva de calibração, os valores médios das medições.

Na Tabela 3 estão os dados obtidos nesta etapa:

Tabela 3 – Calibração da Bomba Peristáltica – marca Ismatec Utilizada no Experimento.

Bombeamento (%)	Vazão (ml/s)
0	0
5	0,00859033
10	0,01708234
20	0,03323363
30	0,05073567
40	0,06802721
50	0,08250825
60	0,10121457
70	0,11750881
80	0,13404826
90	0,14836795
100	0,17035775

Com os dados obtidos na Tabela 3, tem-se a curva apresentada na Figura 3.

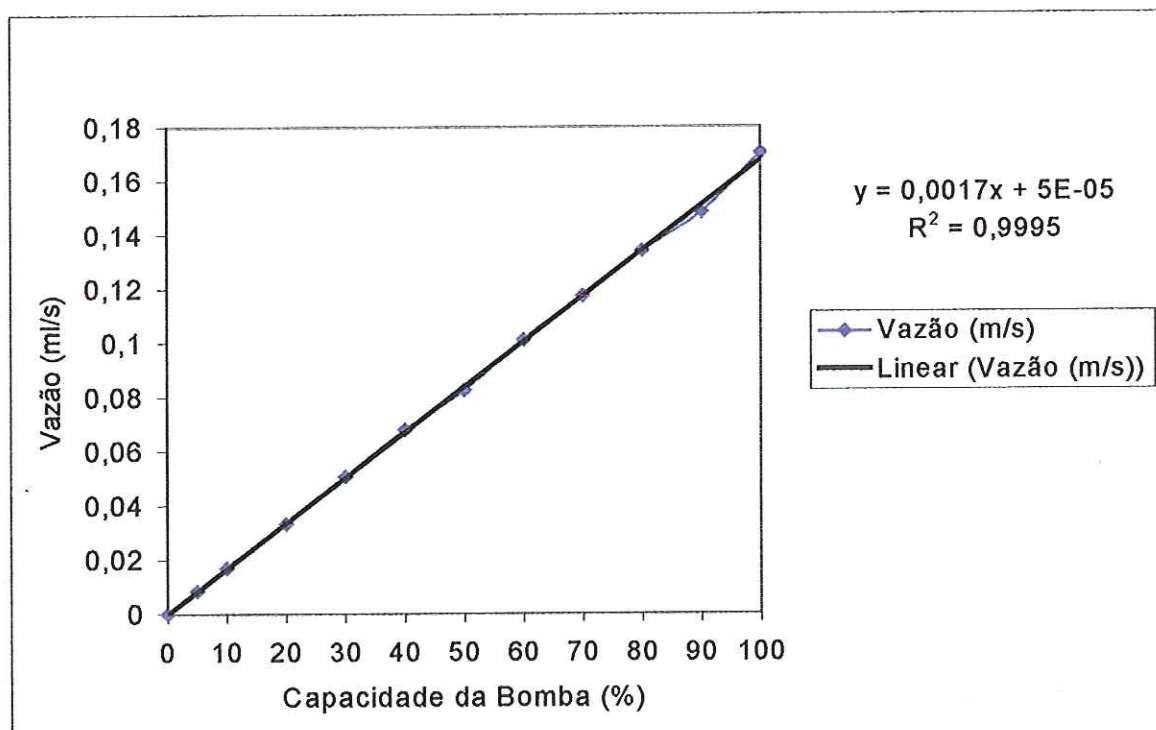


Figura 3 – Curva de Calibração da Bomba Peristáltica – Ismatec.



A partir da obtenção da curva de calibração da bomba dosadora, foram calculados os itens descritos a seguir, sendo que para a determinação dos dados de vazão foram utilizados os seguintes cálculos fixando-se o Tempo de Residência Hidráulico em 26 h:

- Cálculo do Volume Total:

$$V_T = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} \quad \text{onde: } D = \text{diâmetro do reator}$$

$$L = \text{comprimento do reator}$$

Em pesquisas anteriores, o Volume Total do reator diferia do Volume Útil, pois a canalização de separação de gás estava inserida no interior do reator, ocupando certo volume. Na configuração de reator utilizada nesta pesquisa, a canalização de coleta de gás situa-se externamente ao reator, como demonstrado na Figura 1, não ocupando volume útil do mesmo.

- Cálculo da Área da Seção Transversal do Reator (A):

$$A = \frac{V_u}{L} \quad \text{onde: } V_u = \text{volume útil do reator (neste caso igual ao } V_T)$$

- Cálculo da Velocidade superficial de Líquido (v_s):

A velocidade superficial de líquido através do leito foi calculada pela expressão:

$$v_s = \frac{Q}{\varepsilon \cdot A} \quad \text{onde: } Q = \text{vazão volumétrica do líquido}$$

$$\varepsilon = \text{porosidade do leito}$$

$$A = \text{área da seção transversal do reator}$$

Os dados obtidos nesses cálculos foram os seguintes:

$$\text{Volume total (} V_T) = 1991,05 \text{ cm}^3$$

$$\text{Área da Seção Transversal do Reator (} A) = 19,95 \text{ cm}^2$$

$$\text{Velocidade Superficial do Líquido (} v_s) = 0,00115 \text{ cm/s}$$

Com base nos dados obtidos, determinou-se a velocidade superficial do líquido e a vazão a ser utilizada neste experimento. De acordo com estes dados, escolheu-se a porcentagem a ser usada na bomba, a qual foi de 5,0 % da capacidade total da bomba.

4.3 – Inoculação e Partida do Reator.

Na inoculação foi utilizado lodo anaeróbio mesofílico, obtido no reator UASB da Indústria de Papel e Papelão reciclado, situada na cidade de São Carlos. Inicialmente o lodo a ser utilizado seria o do reator UASB da Usina São Martinho, o qual tratava vinhaça em condições termofílicas, mas isto não foi possível, pois o mesmo encontrava-se desativado. Como consequência, a vinhaça, que também seria coletada na mesma empresa, foi substituída pela da Usina da Serra, localizada na cidade de Ibaté, SP, empresa que gentilmente cedeu dois galões de 20 litros de vinhaça. As características físico-químicas da vinhaça utilizada neste experimento estão descritas na Tabela 4 apresentada a seguir:

Tabela 4 - Características Físico-Químicas da Vinhaça.

Análises Realizadas	Resultados Obtidos
pH	7,2
DQO	20.000 mg/l
Alcalinidade	3.500 mg/l
Ácidos Voláteis	2.500 mg/l
Nitrogênio Total	449 mg/l
Fósforo	65 mg/l

Para a inoculação do reator, utilizou-se o procedimento descrito por ZAIAT (1996). Ressalte-se que, nesta referência, o tempo de contato que deve ser mantido entre as espumas e o lodo é de no mínimo de 2 horas, sendo que neste experimento utilizou-se o tempo de 12 horas. O lodo foi passado por uma peneira fina para se obter certa uniformidade no tamanho dos sólidos em suspensão. Após as 12 horas, as espumas com o lodo aderido foram colocadas no interior do reator. No momento do fechamento dos pontos de amostragem, ocorreu a quebra de uma das roscas, sendo

necessário o conserto do reator. Por esse motivo, as espumas com o lodo aderido foram guardadas em geladeira, em frascos contendo o meio a ser utilizado, até o conserto do reator, fato esse que demorou cerca de 5 dias.

Após o conserto do reator, as espumas foram novamente colocadas no interior do reator e foi dada a partida do mesmo. Após a partida, observou-se que a produção de metano e a remoção de DQO do sistema, inicialmente desconsideráveis, tiveram aumento progressivo, mas não em termos satisfatórios para o sistema. Outro problema detectado foi o aumento da produção de ácidos voláteis, com conseqüente decréscimo da alcalinidade a bicarbonatos. Pela análise destes dados, concluiu-se pela necessidade de mudança na operação de partida do reator, cuja alimentação passou a ser em circuito fechado com ciclos variando de acordo com o decréscimo da DQO, conforme ilustrado na Figura 4 apresentada a seguir.

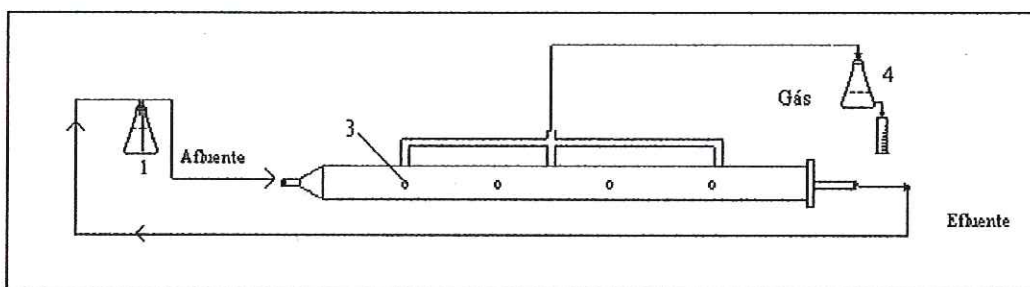


Figura 4 - Esquema do Sistema em Circuito Fechado.

Um dos fatores que deve ser levado em conta na partida e operação do reator é o nível do líquido no interior do mesmo, que deve ser mantido. Para tal fez-se necessário a colocação de um dispositivo na saída do reator para garantir que não ocorresse o sifonamento do líquido, causando seu esvaziamento. Esse objetivo foi conseguido sem a necessidade de construção de dispositivo especial, mas apenas elevando-se a mangueira da saída do reator até a altura dos tubos de saída do gás. A Figura 5 demonstra esquematicamente seu funcionamento.

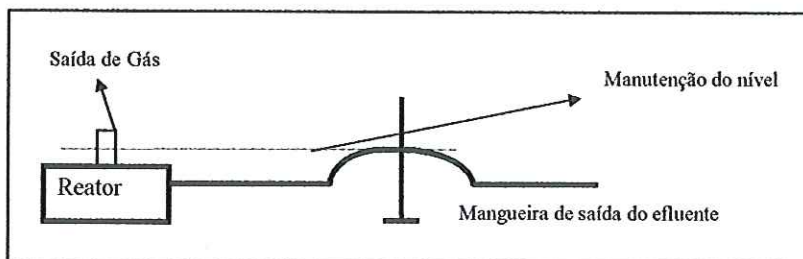


Figura 5 - Desenho Esquemático do Sistema para Evitar o Sifonamento do Reator.

4.4 - Adaptação do Lodo.

Para a adaptação do lodo do reator à temperatura de 55°C iniciou-se a operação à temperatura de 35°C. Após período de adaptação de alguns dias, procedeu-se à observação periódica de amostras de lodo. De acordo com os resultados dessas observações, procedia-se ao aumento da temperatura em 2 graus, caso não fossem observados problemas na microbiota. Paralelamente, observava-se a eficiência do reator para se evitar que o mesmo sofresse quedas bruscas de desempenho e entrasse em colapso. Procedeu-se desta forma até atingir-se a temperatura de 55°C.

A composição microbiológica das amostras do lodo anaeróbio foi observada utilizando-se a microscopia ótica, sendo que o microscópio utilizado foi o Óptico - BH2 Olympus e o procedimento adotado foi o seguinte, eram preparadas lâminas recoberta por gel agar a 2%, onde foram espremidas as espumas com posterior recobrimento da lâmina com uma lamínula, o aumento obtido neste microscópio foi de 1250 vezes.

4.5 - Operação do Reator.

Ao atingir-se a temperatura de 55°C, o reator voltou a operar em circuito aberto. Devido às suas características, o reator RAHLF apresenta um problema operacional não satisfatoriamente resolvido, que é o da variação do nível de líquido em seu interior. Esse fato exige a atenção do operador no controle do nível de líquido, evitando-se que tal fator influencie na eficiência do sistema.

Ressalta-se que, nesta etapa, ocorreram inúmeros problemas experimentais, que resultaram em atraso na obtenção dos dados necessários para a conclusão e término do experimento.

Um deles ocorreu no sistema de aquecimento da câmara, o ventilador teve que ser substituído e o controlador de temperatura teve seu sistema avariado, sendo necessário seu conserto, o que resultou em atraso de 2 semanas, além de ser necessário um tempo para o sistema voltar à temperatura original e se reequilibrar.

A partir desta etapa, o reator foi operado até a sua estabilização. O desempenho foi avaliado no que diz respeito à eficiência de remoção de DQO e

produção de gás metano, tendo o reator sido operado com um tempo de detenção hidráulico de 26 horas.

O monitoramento do reator foi realizado através de coleta e análise de amostras do afluente, do efluente. As amostras foram analisadas quanto a DQO, pH, Alcalinidade a Bicarbonato e Ácidos Orgânicos Voláteis, de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1995).

As análises de DQO, pH, Alcalinidade a Bicarbonato e Ácidos Orgânicos Voláteis foram realizadas de acordo com a necessidade, visando a avaliação do processo nas várias etapas de operação do reator.

As amostras gasosas foram analisadas sempre que possível, por cromatografia, utilizando-se cromatógrafo Gow-Mac com detector de condutividade térmica.

Para análise dos dados obtidos nas coletadas dos gases adotou-se o seguinte método: os dados do gás, serão os da amostra coletada no meio (ponto 2) do reator, no qual ocorre a homogeneização do gás, em relação à amostra coletada na entrada (ponto 1) e na saída (ponto 3) do reator, pois em todas as amostragens realizadas observou-se que no Ponto 1 do reator a quantidade de metano é menor do que no Ponto 3, por isso optou-se pela análise dos dados obtidos no ponto 2 do reator, de acordo com a Figura 6:

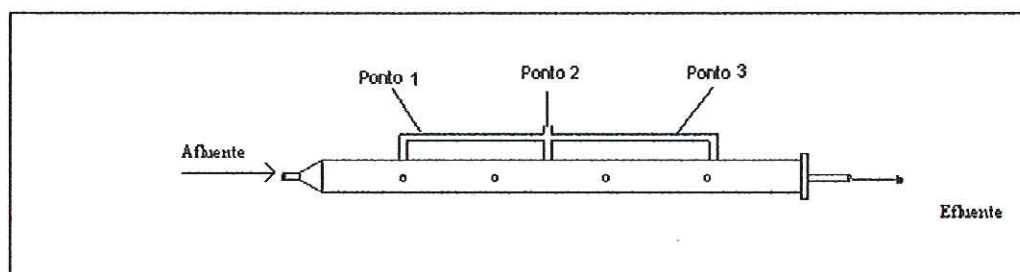


Figura 6 – Pontos de Coleta de Gases no RAHLF.

A composição microbiológica de amostras de lodo anaeróbio foi avaliada utilizando-se microscopia ótica com lâminas recobertas por gel Agar a 2%, onde foram espremidas as espumas com posterior recobrimento da lâmina com uma lamínula, o aumento obtido neste microscópio foi de 1250 vezes; microscopia eletrônica de varredura sendo que o microscópio utilizado foi o seguinte: Microscópio digital Scanning Microscope DSM 960 – Zeiss, o procedimento utilizado nesta etapa

foi o seguinte: colocou-se a espuma em um tubo de ensaio e cobriu-se com solução tampão fosfato (0,1M) com glutaraldeído (2,5%) por 12h (gelado); após lavou-se cada amostra por três vezes durante 10 minutos com solução tampão fosfato (gelado); após lavou-se uma vez por dez minutos primeiramente com álcool a 50%, depois com álcool a 70%, depois com álcool a 80% depois com álcool a 90% e finalmente com álcool a 95%. Após lavou-se por três vezes as amostras com álcool 100% por 10 min, finalmente lavou-se por duas vezes com HMDS por 30 min; grudou-se a espuma no suporte com esmalte e finalmente levou-se a amostra para ser coberta com ouro sendo que só a partir desta etapa que as amostras puderam ser observadas no microscópio.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Inoculação e Partida do Reator.

A inoculação do reator foi realizada de acordo com a metodologia descrita no item 4.2.

Após o acerto do nível do líquido no interior do reator, iniciaram-se as coletas das amostras para a avaliação de desempenho, observando-se a necessidade de mudanças na configuração do sistema em função da ocorrência de problemas.

Nas Tabelas 5 e 6, estão apresentados os resultados obtidos na fase de inoculação e partida do reator. Para melhor visualização dos dados, estes foram colocados em tabelas separadas, para afluente e efluente.

O meio de cultura utilizado nesta fase do experimento apresentava DQO de entrada de 20000 mg/l, pH de 7,0. A dosagem de bicarbonato era de, aproximadamente, 8 g de bicarbonato de sódio/l de meio.

Tabela 5 - Dados Obtidos no Monitoramento do Afluente na Partida do Reator Enquanto o Reator se Encontrava em Circuito Aberto.

Tempo	pH	Alc. Total	Alc. a Bic.	Alc. a AV	AOV	DQO não filtrada	DQO filtrada
1	7,46	3349,85	1244,23	2105,62	3049,64	12680	11500
3	7,30	4386,71	2043,81	2342,9	3176,71	13160	12530
5	7,43	4998,19	1914,20	3083,99	4438,03	15005	13492
8	7,62	9788,52	5709,97	4078,55	4324,21	15390	14157
10	7,74	4833,35	2057,76	2775,59	4129,16	17350	15865
12	7,59	5168,34	2153,47	3014,86	3643,38	18110	15540
16	7,26	5072,01	2105,62	2967,01	3737,84	17850	16292

Tabela 6 - Dados Obtidos no Monitoramento do Efluente na Partida do Reator Enquanto o Reator se Encontrava em Circuito Aberto.

Tempo	pH	Alc. Total	Alc. a Bic.	Alc. a AV	AOV	DQO não filtrada	DQO filtrada
1	7,31	5359,76	1627,07	3732,69	5424,59	12750	11950
3	7,06	5072,63	1435,65	3636,98	5343,62	9835	7870
5	7,18	5600,05	1629,11	3970,94	6129,72	11950	11915
8	7,84	9382,09	5352,20	4029,89	5326,58	12267	12327
10	7,77	7465,38	3206,28	4259,10	5505,55	13660	12537
12	7,86	5981,87	1914,2	4067,67	5653,98	14187	12475
16	7,65	6699,7	2584,17	4115,53	5208,68	13597	12597

Comparando-se os dados das Tabelas 5 e 6, observa-se que os valores da alcalinidade a bicarbonatos sofrem decréscimo para a maioria das amostragens, com conseqüente aumento da alcalinidade devida a ácidos voláteis. Esse fato indica possível início de desequilíbrio no processo. Caso ocorra acúmulo de ácidos, poderá haver queda do pH e acidificação do reator se o pH atingir valores menores do que 6,0.

Esses valores podem ser observados nas Figuras 7, 8, 9 e 10, onde estão demonstradas as comparações entre os mesmos parâmetros na entrada e na saída do reator.

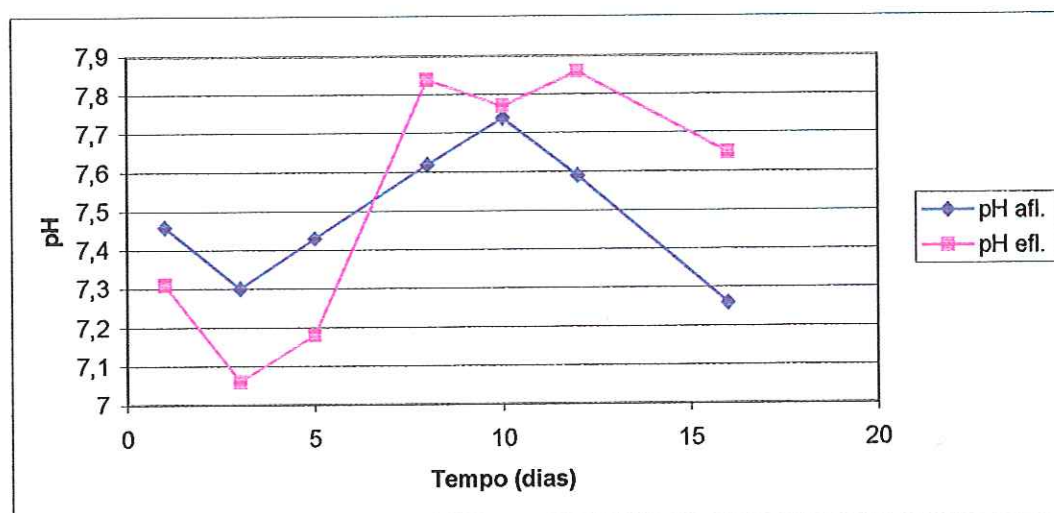


Figura 7 - Dados comparativos de pH - Circuito Aberto.

Observa-se que, inicialmente, o pH no efluente é menor do que no afluente e essa diferença se mantém. Porém, com o passar do tempo, inicia-se a queda dos valores do pH tanto no afluente quanto no efluente.

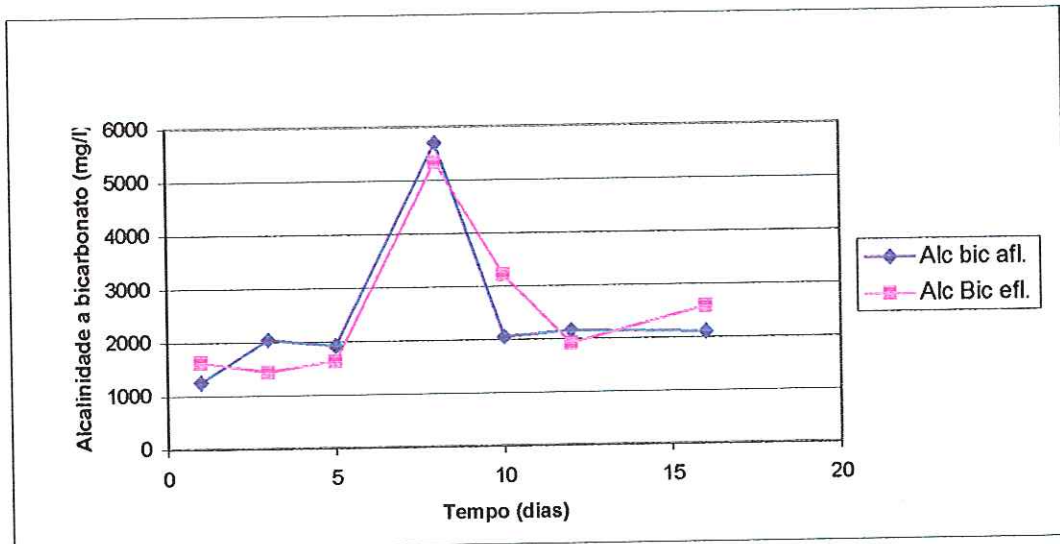


Figura 8 - Dados Comparativos de Alcalinidade a Bicarbonato - Circuito Aberto.

Não são observadas mudanças bruscas na alcalinidade a bicarbonato nesta fase, pois os valores, tanto na entrada como na saída, indicam que ela se mantém constante, não tendo ocorrido nem a produção e nem o consumo da alcalinidade, apesar de ocorrer decréscimo nos valores de pH.

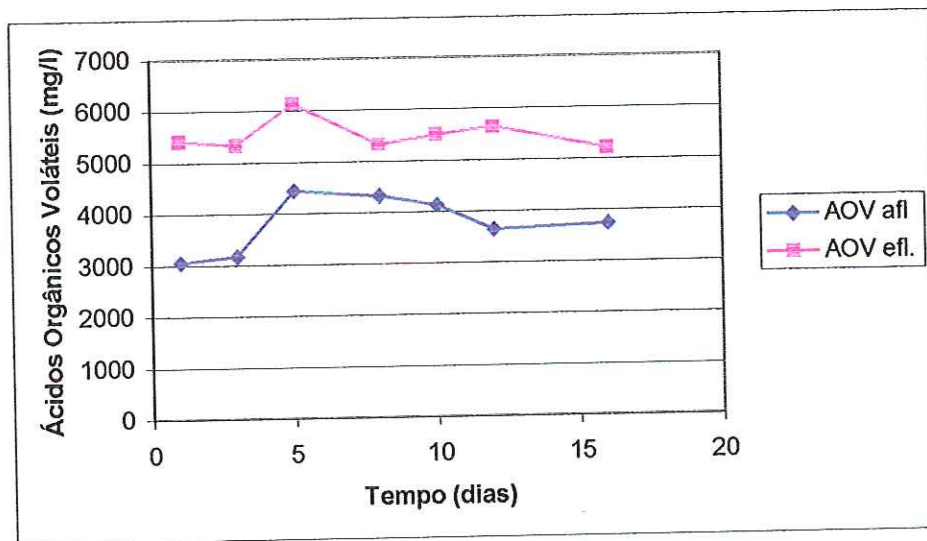


Figura 9 - Dados Comparativos de Ácidos Orgânicos Voláteis - Circuito Aberto.

Na Figura 9, verifica-se o aumento nos ácidos orgânicos voláteis no efluente do sistema, sendo que, caso esses valores se elevem consideravelmente o reator poderá entrar em processo de acidificação devido ao acúmulo de ácidos voláteis no sistema.

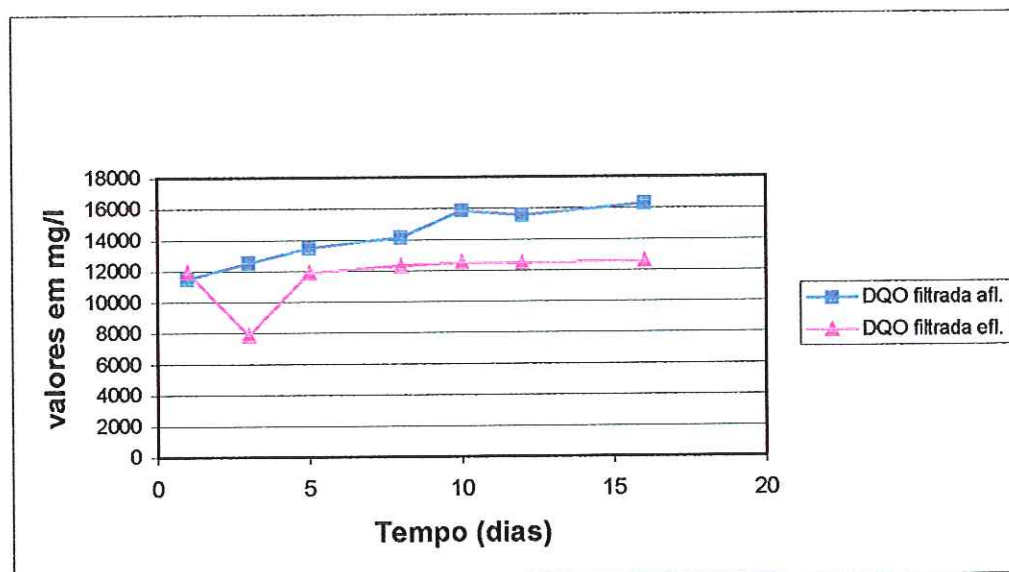


Figura 10 - Dados Comparativos de DQO filtrada - Circuito Aberto.

Analisando-se a Figura 10, observa-se que os valores de DQO no afluente são maiores que no efluente, evidenciando que o sistema está removendo matéria orgânica, apesar de estar acumulando ácidos. Os dados da eficiência de remoção da DQO filtrada estão demonstrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Eficiência de Remoção de DQO filtrada, no período que varia do dia 10/08/98 a 25/08/98.

Tempo	DQO do Afluente	DQO do Efluente	% de remoção de DQO
1	11500	11950	Sem remoção
3	12530	7870	37,19
5	13492	11915	11,69
8	14157	12327	12,92
10	15865	12537	20,97
12	15540	12475	19,72
16	16292	12597	22,68

Na Tabela 7 pode-se observar a eficiência de remoção da DQO em termos de porcentagem. Os dados mostram a baixa eficiência do sistema, sendo que, na primeira análise, observa-se que o efluente apresenta valores de DQO maiores que os do afluente. A eficiência de remoção foi baixa, comprovando que o sistema estava com problemas.

Para comprovar novamente o ocorrido, analisou-se a composição de gás do

sistema, sendo que os dados estão na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição das Amostras Gasosas Coletadas no Período de Partida do Reator em Circuito Aberto em Porcentagem.

Tempo	Ar	Metano	CO ₂
1	16,7	10,64	72,65
2	53,67	12,33	33,99
3	32,52	12,90	54,57
5	32,44	13,97	53,58
9	45,97	10,12	43,90

Na Tabela 8, apresentam-se os valores de composição do gás obtidos a partir da cromatografia gasosa de amostras coletadas no reator no período. Pode-se observar que o sistema apresenta alta porcentagem de CO₂ e baixa porcentagem de metano. Esses resultados indicam o processo metanogênico não se encontrava plenamente estabelecido. Nessas condições, pode ocorrer o abaixamento do pH e o deslocamento das reações no sentido da formação preferencial dos ácidos propiônico e butírico. Para águas residuárias que apresentam elevada concentração de matéria orgânica, como é o caso da vinhaça, pode ocorrer a sobrecarga de ácidos propiônicos e o reator entra em colapso, havendo necessidade de nova partida.

A análise conjunta dos dados desta primeira etapa de operação permite verificar que o reator não estava trabalhando em suas melhores condições. Os dados sugerem que a metanogênese não havia se estabelecido adequadamente e a degradação de ácidos voláteis era baixa. No entanto, o substrato estava tamponado, o que mantinha o pH elevado, apesar da alta concentração de ácidos orgânicos voláteis.

Para melhor visualização do que estava ocorrendo no interior do reator foram coletadas amostras em vários pontos do reator, esses dados estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados das Análises ao Longo do Reator.

Análises	Afluente	Ponto 1	Ponto 3	Efluente
pH	7,2	8,0	7,9	7,6
DQO Bruta	17850	15002	13312	12250
DQO Filtrada	16292	14437	11807	11130
Alcalinidade a Bicarbonatos	2105,6	2105,6	2488,5	2584,2
Alcalinidade a Ácidos Voláteis	2967,0	3637,0	4019,8	4115,5
Ácidos Orgânicos Voláteis	3737,8	3994,2	4911,8	5208,7

Pela Tabela 9, observa-se que a biomassa metanogênica não se encontrava

totalmente adaptada, tendo ocorrido o aumento progressivo tanto da alcalinidade de ácidos voláteis como dos ácidos orgânicos voláteis no interior do reator.

Para melhorar as condições da metanogênese, passou-se a operar o reator em circuito fechado.

A partir de então, com o reator operando em circuito fechado, iniciou-se novamente a observação dos resultados para verificar se a medida tomada havia sido eficiente ou se haveria necessidade de nova mudança no sistema.

Nas Tabelas 10 e 11 estão os dados de Afluente e Efluente do reator neste período, deve-se levar em conta que o efluente que sai do sistema se mistura ao meio previamente diluído, por isso que os valores de DQO do afluente diminuem com o passar do tempo. Para efeitos de análise os gráficos serão do mesmo tipo utilizado até o presente momento.

O reator trabalhou em sistema de batelada. O meio de cultura era trocado por um novo quando a DQO do efluente se encontrava em valores inferiores a 5.000 mg/l, pois observou-se que a partir desses valores o sistema se mantinha estável, ou seja, não ocorria remoção de DQO em valores abaixo do acima citado.

Tabela 10 - Dados Obtidos no Monitoramento do Reator em Circuito Fechado-Afluente.

Tempo (dias)	pH	Alc. Total	Alc. a Bic.	Alc. a AV	AOV	DQO não filtrada	DQO filtrada
1	8,5	7901,6	5341,9	2559,7	2981,2	10222	9042
6	9,0	7603,6	6540,2	1063,4	1739,2	7225	6450
8	8,8	8499,0	6517,8	1981,2	2280,5	7685	6917
11	8,7	8144,3	6402,9	1741,9	1781,2	6535	5750
13	8,4	6651,8	4785,5	1866,3	2132,1	9302	7780
18	8,0	5927,5	3643,5	2283,9	2208,1	11950	8765
20	8,6	6938,9	4929,1	2009,9	1875,7	6257	5612
22	8,8	7130,4	5934,0	1196,4	809,6	4592	4047

Tabela 11 - Dados Obtidos no Monitoramento do Reator em Circuito Fechado Efluente.

Tempo (dias)	pH	Alc. Total	Alc. a Bic.	Alc. a AV	AOV	DQO não filtrada	DQO filtrada
1	8,3	8805,3	6603,9	2201,3	2671,8	3385	3005
6	8,7	8720,2	6965,6	1754,7	1799,2	7075	6600
8	8,5	8566,0	6594,4	1971,6	2320,9	6982	6447
11	8,3	8154,5	6508,3	1646,2	1619,3	5795	5330
13	8,4	8183,2	6843,3	1339,9	1349,4	5897	5312
18	8,3	8195,2	6938,9	1256,2	1214,5	5597	3942
20	8,4	6986,8	5838,9	1148,5	944,6	4820	4275
22	8,3	6974,6	5192,8	1781,8	1693,9	6080	5292

Pelas Tabelas 10 e 11, verifica-se o aumento da alcalinidade a bicarbonatos no efluente em relação ao afluente, demonstrando que estava ocorrendo a produção de alcalinidade a bicarbonatos no sistema. Como consequência, houve decréscimo da alcalinidade a ácidos e nos valores de ácidos orgânicos voláteis.

Pode-se verificar esses fatos com maior facilidade pelas Figuras 11, 12, 13 e 14.

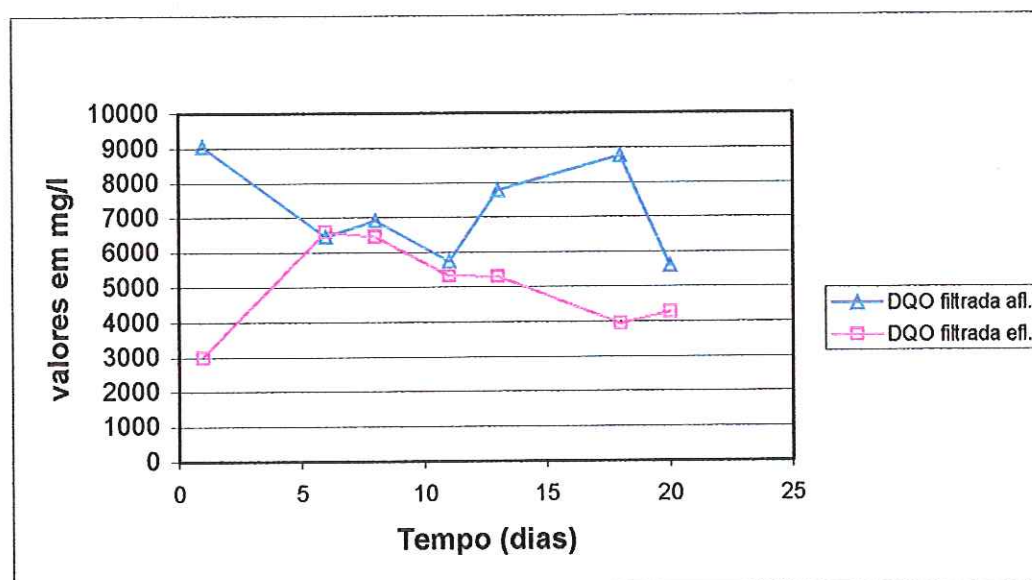


Figura 11 - Dados Comparativos de DQO filtrada - Circuito Fechado.

Na Figura 11, verifica-se que a DQO do afluente inicialmente é superior à do efluente, sendo que, em algumas datas, as mesmas se aproximam, demonstrando diminuição da eficiência de remoção de matéria orgânica, deve ser lembrado que o

efluente era misturado ao afluente. Isso foi observado para valores de DQO do afluente na faixa de 5000 a 7000 mg/l. Para valores acima desta faixa observou-se a ocorrência de remoção de DQO.

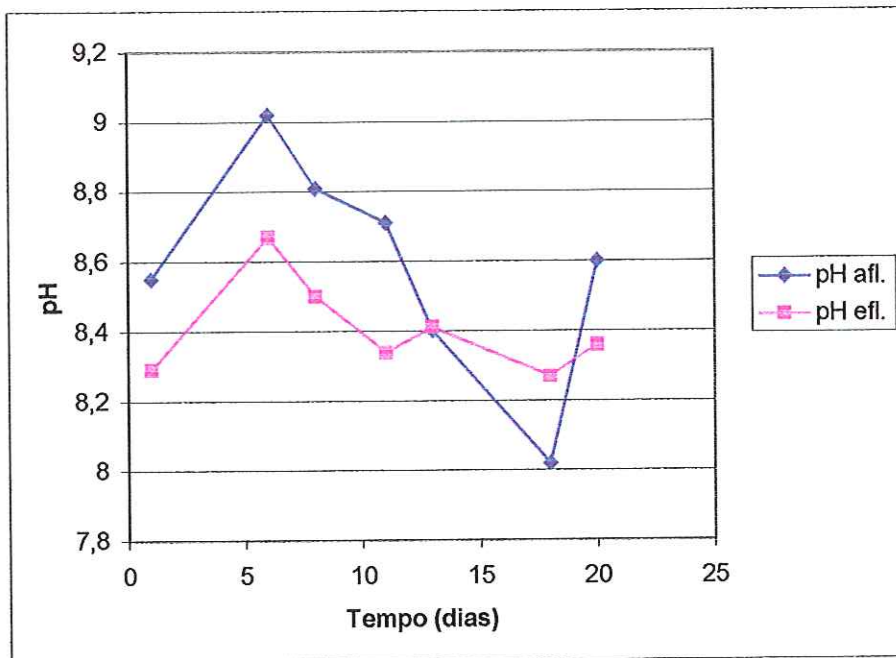


Figura 12 - Dados Cômparativos de pH - Circuito Fechado.

Pela análise da Figura 12, verifica-se que, na maior parte do tempo, os valores de pH do efluente eram menores que os do afluente. Observa-se, porém, que o meio estava altamente tamponado, pois os valores de pH, tanto de entrada, como de saída, eram elevados.

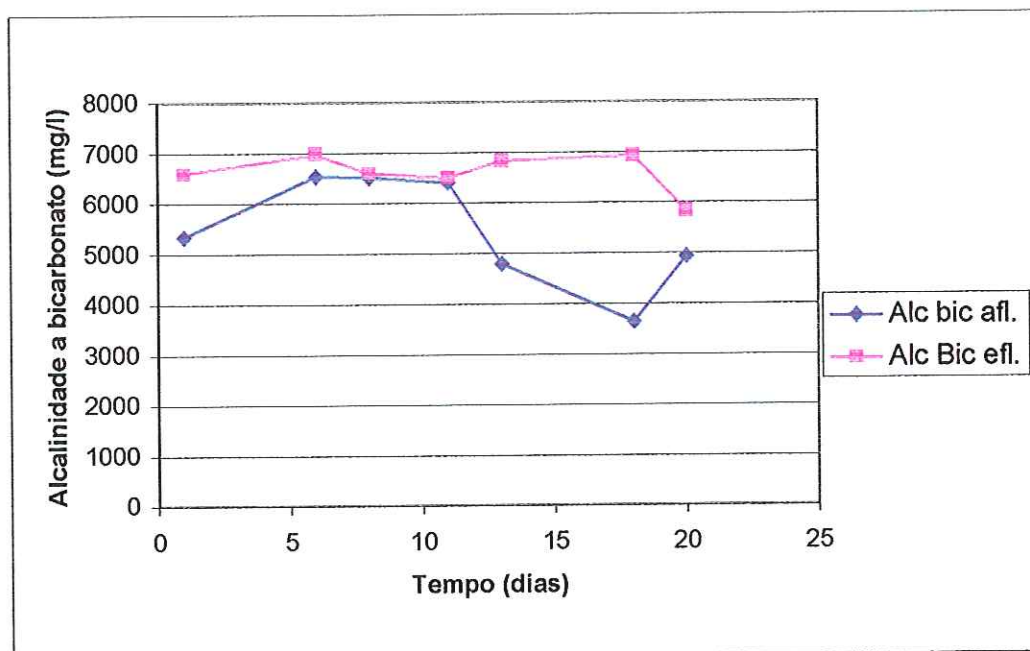


Figura 13 - Dados Comparativos de Alcalinidade a Bicarbonato - Circuito Fechado.

Pela análise da Figura 13, verifica-se que na maior parte do tempo deste experimento houve produção de alcalinidade.

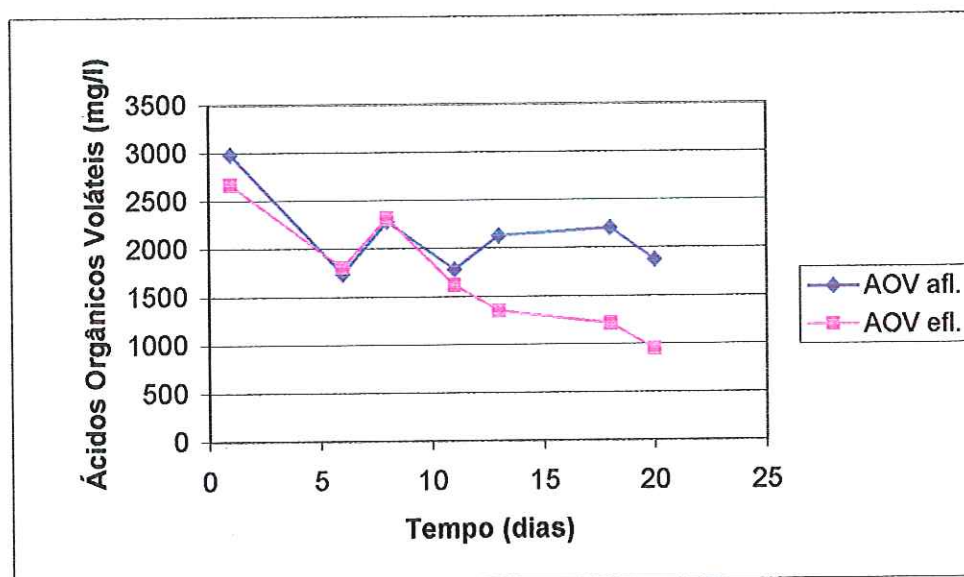


Figura 14 – Dados Comparativos de Ácidos Orgânicos Voláteis – Circuito Fechado.

Ao analisarmos os dados de ácidos voláteis na Figura 14, verifica-se que o mesmo se reduz se compararmos os valores de afluente e efluente do reator.

O decréscimo na concentração de ácidos voláteis indica que há a recuperação do processo, pois o consumo de ácidos voláteis se dá através da metanogênese. O pH do sistema elevou-se para valores acima de 8, sendo que o valor do pH no afluente foi mantido sempre em 7,0. A recirculação do efluente resultou na produção de alcalinidade a bicarbonatos, cuja concentração aumentou com o tempo de operação, comprovando a recuperação do sistema.

Tabela 12 – Eficiência de Remoção de DQO.

Tempo (dias)	DQO do Afluente	DQO do Efluente	% de remoção de DQO
1	9042	3005	66,76
6	6450	6600	Sem remoção
8	6917	6447	Sem remoção
11	5750	5330	7,30
13	7780	5312	31,72
18	8765	3942	55,02
20	5612	4275	23,82
22	4047	5292	Sem remoção

Conforme pode ser observado na Tabela 12, em alguns casos não ocorre remoção de DQO. Acredita-se que os dados pouco consistentes desta fase possam ser atribuídos à lenta adaptação da microbiota às novas características do afluente, que variam ao longo do tempo e ao fato de todo efluente do sistema estar sendo misturado ao afluente, dificultando uma análise mais profunda. É provável que determinadas frações da matéria orgânica que compõem a DQO sejam mais facilmente removidas que outras, havendo necessidade de se gerar biomassa apta a fermentar as frações mais resistentes à biodegradação, antes da conversão final a metano. Obteve-se, em seguida, remoção superior a 30%, demonstrando a adaptação do sistema, e observou-se, também, que a remoção ocorreu em determinadas faixas de DQO. Nota-se claramente que, ao se atingirem valores inferiores a 5000mg/l, a eficiência caiu drasticamente, chegando mesmo a ser desconsiderável em alguns casos.

Na Tabela 13 estão os dados da composição gasosa, obtidos no período em questão.

Tabela 13 – Composição das Amostras Gasosas Coletadas no Período de Partida do Reator em Circuito Aberto em Porcentagem.

Tempo (dias)	Ar	Metano	CO ₂
16	24,41	37,25	38,33
17	20,55	43,33	36,11
20	31,02	57,14	11,83

Tabela 14 – Composição das Amostras Gasosas Coletadas no Período de Partida do Reator em Circuito Fechado em Porcentagem.

Tempo (dias)	Ar	Metano	CO ₂
1	24,11	60,24	15,65
6	26,38	62,05	11,56
11	25,00	69,68	5,31
13	11,74	58,57	29,29
20	19,98	73,32	6,69
22	29,05	61,28	9,66

Os resultados apresentados nas Tabelas 13 e 14 permitem observar o aumento gradativo da produção de metano no reator com o tempo, indicando a ocorrência da degradação da matéria orgânica presente na vinhaça.

Nesta segunda etapa da partida do reator, observou-se o aumento eficiência da remoção da DQO e da produção de metano, diminuição da quantidade de ácidos e da alcalinidade a ácidos. Isso demonstra que, neste modo de operação, o processo de adaptação ocorreu de maneira mais eficiente. Esse resultado permite concluir que o aumento gradativo da temperatura de 35 para 55°C deve ser acompanhado pelo monitoramento do afluente e efluente do reator a fim de se verificar a ocorrência de possíveis efeitos negativos devido à mudança de temperatura.

Nesta fase de operação fica difícil de se avaliar a remoção de DQO, pois o sistema encontrava-se em circuito fechado, sendo que o efluente coletado na saída do reator era o utilizado na fase seguinte. Essa é a razão de não ter sido observada

remoção de DQO em alguns casos. Como o tempo de detenção do reator era de 26 horas, seria necessário mais de um dia para se notar a eficiência de remoção do reator.

5.2 – Adaptação do Lodo.

Nas Tabelas de 15 a 22 encontram-se os resultados dos parâmetros de monitoramento do reator: pH, Alcalinidade Total, a Bicarbonato e a Ácidos Voláteis, Ácidos Voláteis, DQO não filtrada e DQO filtrada. Nas Tabelas 15 A a 18 A estão listados os resultados dos exames microscópicos do lodo em cada situação estudada. A diluição utilizada para a vinhaça foi de aproximadamente 1:5.

Tabela 15 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 37° C, no dia 25/09/98.

Análises	Afluente	Efluente
pH	8,8	8,4
Alc. Total	7130,4	6986,8
Alc. a Bicarbonato	5934,0	5838,9
Alc. a Ácidos	1196,4	1148,5
Ácidos Voláteis	809,6	944,6
DQO não filtrada	4592,5	4820,0
DQO filtrada	4047	4275

De acordo com os dados apresentados na Tabela 15 observa-se que, no momento das análises microscópicas, não estava ocorrendo remoção de DQO, apesar das baixas concentrações de alcalinidade a ácidos voláteis. Supõe-se que a remoção da DQO poderia não estar ocorrendo devido ao fato da mesma estar com valores abaixo de 5000 mg/l, valor esse em que foi observada uma queda na remoção de DQO pelo sistema.

Tabela 15 A – Planilha de Microscopia, Amostra do Dia 25/09/98 na Temperatura de 37°C.

Morfologias	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Cocos pequenos	++	++	+	+	+
Cocos grandes	+++	+++	+++	+++	++
Colar de cocos	+	-	-	-	-
Bacilos pequenos	++	++	++	++	++
Bacilos grandes	++++	++++	+++	+++	++++
Bacilos longos	+	-	+	+	+
Filamentos longos e delgados	-	-	-	-	-
Filamentos semelhantes a <i>Methanotrix</i>	-	-	-	-	-
Presença de Bactérias	+++	+++	+++	+++	+++
Morfologia Predominante	mista	Mista	mista	mista	Mista

Simbologia Adotada:

1 – Frequência de células:

+ : presença de poucas células ++ : razoável +++ : muito ++++ : predomínio

2 – Dimensões:

- cocos: pequenos (menores que 2 μm) , grandes 9 (acima de 2 μm) , em relação ao diâmetro;
- bacilos: pequenos (4 a 6 μm em relação ao comprimento) , longos (10 a 20 μm em relação ao comprimento) , grandes (acima de 8 a 12 μm , com relação à diâmetro).

Pelos dados apresentados na Tabela 15 A, verifica-se a presença de cultura mista no sistema e observam-se, nas amostras, a predominância de bacilos e cocos grandes.

Tabela 16 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 40° C, no dia 28/09/98.

Análises	Afluente	Efluente
pH	8,8	8,4
Alc. Total	6891,1	6747,6
Alc. a Bicarbonato	5072,6	5455,5
Alc. A Ácidos	1818,5	1292,1
Ácidos Voláteis	1862,2	1200,9
DQO não filtrada	6472	4812
DQO filtrada	5227	4435

Tabela 16 A - Planilha de Microscopia, Amostra do Dia 30/09/98 na Temperatura de 40°C.

Morfologias	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Cocos pequenos	-	-	+++	+++	-
Cocos grandes	+++	+++	-	++	++
Colar de cocos	+	+	-	+	+
Bacilos pequenos	+++	+++	+++	+++	-
Bacilos grandes	++	++	+	+++	++
Bacilos longos	+	+	+	++	++
Filamentos longos e delgados	+	+	-	+	-
Filamentos semelhantes a <i>Methanotrix</i>	+	++	+	-	-
Presença de Bactérias	++	++	+++	-	+
Morfologia Predominante	mista	Mista	mista	Mista	Mista

Os dados mostrados na Tabela 16 permitem supor que o sistema não foi prejudicado com a mudança da temperatura, a qual foi aumentada de 37 para 40°C, devido ao fato de ocorrer remoção da DQO. Os valores de remoção são baixos, mas quando comparados aos obtidos na temperatura anterior, observa-se que ocorreu melhora no sistema, apesar dos valores do efluente se encontrarem próximos a 5000 mg/l.

Observam-se pequenas mudanças na composição da microbiota quando a temperatura de operação era de 40° C. A observação visual das amostras coletadas no permitiu verificar que a quantidade de bacilos grandes diminuiu e houve aumento da quantidade de bacilos pequenos nas amostras. Quanto aos cocos, não foi possível

observar variação significativa nas suas quantidades. Nessas amostras, observa-se o aparecimento de filamentos longos e delgados e alguns filamentos semelhantes a *Methanotrix* sp.

Tabela 17 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 43° C, no período de Adaptação - Dados do Afluente.

Data	pH	Alc. Total	Alc. a Bic.	Alc. a AV	AOV	DQO não filtrada	DQO filtrada
30/09/98	9,2	6763,4	6253,8	509,6	853,4	4840	4520
05/10/98	8,9	6749,5	5965,7	783,8	481,3	4637	4125
14/10/98	8,7	4877,0	3657,8	1219,3	1360,9	5282	4800

Tabela 18 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 43° C, no período de Adaptação - Dados do Efluente.

Data	pH	Alc. Total	Alc. a Bic.	Alc. a AV	AOV	DQO não filtrada	DQO filtrada
30/09/98	8,5	6531,8	6096,3	435,5	320,9	4112	3867
05/10/98	8,6	6434,9	5660,9	773,1	560,3	4325	4050
14/10/98	8,5	5747,9	4615,8	1132,2	1031,4	4367	4280

Observa-se, pelos resultados apresentados nas Tabelas 17 e 18, que a remoção da DQO continua sendo representativa, mesmo para valores de DQO afluente abaixo de 5000 mg/l. Este fato foi observado anteriormente, na temperatura de 40°C, o mesmo não ocorrendo na temperatura de 37°C. Ressalta-se que, nesta etapa, os valores obtidos da DQO do efluente eram próximos e inferiores a 4000 mg/l, podendo-se afirmar que, na faixa de temperaturas mais próximas da termofílica, ocorreu maior remoção da matéria orgânica presente no afluente.

Tabela 17 A - Planilha de Microscopia, Amostra do Dia 19/10/98 na Temperatura de 47°C.

Morfologias	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Cocos pequenos	+++	++	+	+++	+
cocos grandes	++	+++	++	++	++
colar de cocos	-	-	+	+	-
Bacilos pequenos	++	+++	+++	++	++
Bacilos grandes	+++	+++	+++	++	+++
bacilos longos	++	+	+	+	+
Filamentos longos e delgados	+	++	++	+	+
filamentos semelhantes a methanotrix	+	+	+	+	+
Presença de Bactérias	+++	-	-	++	-
Morfologia Predominante	mista	Mista	mista	Mista	mista

Conforme mostrado na Tabela 17 A, observou-se o aumento da quantidade de microrganismos em geral, sendo que a quantidade de bacilos, tanto pequenos como grandes, praticamente se iguala, o mesmo ocorrendo com os cocos.

Observa-se, também, mudança nas características das amostras coletadas nos pontos ao final do reator (Ponto 4 e Ponto 5). A quantidade de microrganismos diminuiu nesses pontos e pode-se observar, a olho nu, menor quantidade de grânulos aderidos à espuma. A observação das amostras ao microscópio permitiu visualizar mais claramente a diminuição da microbiota presente.

Tabela 19 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 50° C, no período de Adaptação - Dados do Afluente.

Data	pH	Alc. Total	Alc. a Bic.	Alc. a AV	AOV	DQO não filtrada	DQO filtrada
21/10/98	8,4	5051,2	2873,9	2177,3	2337,8	6567	5317
23/10/98	8,1	4160,9	1548,3	2612,7	3590,8	10275	9415
26/10/98	7,8	4267,4	1393,4	2873,9	3713,0	19947	19215
28/10/98	8,1	6009,2	2177,3	3831,9	5134,1	14407	13032

Tabela 20 – Resultados das Análises do Reator, na Temperatura de 50° C, no período de Adaptação - Dados do Efluente.

Data	pH	Alc. Total	Alc. a Bic.	Alc. a AV	AOV	DQO não filtrada	DQO filtrada
21/10/98	8,2	5051,2	3135,2	1915,9	1982,6	5855	4752
23/10/98	7,8	4354,5	1741,8	2612,7	3071,3	9035	8800
26/10/98	7,6	4354,5	1393,4	2961,1	3896,4	17890	17018
28/10/98	7,9	6357,6	2612,7	3744,9	5454,9	13317	12612

Tabela 19 A - Planilha de Microscopia, Amostra do Dia 29/10/98 na Temperatura de 50°C.

Morfologias	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Cocos pequenos	+++	++	+	+	+
Cocos grandes	+++	++	+	+	+
Colar de cocos	+	+	+		-
Bacilos pequenos	+++	++	++	+	+
Bacilos grandes	++	+++	+++	+	+
Bacilos longos	++	-	-	-	-
Filamentos longos e delgados	++	++	++	-	-
Filamentos semelhantes a <i>Methanotrix</i>	+	+	+	-	-
Presença de Bactérias	++	++	+	+	+
Morfologia Predominante	mista	Mista	Mista	Mista	mista

Para obter-se a eficiência de remoção da DQO afluente ao reator, foram realizadas diversas análises em diferentes tempos de operação e observou-se que, em todos os momentos, ocorreu a remoção da matéria orgânica presente. Os resultados mostram, também, que a microbiota estava correspondendo positivamente ao aumento gradual da temperatura.

Novamente observou-se que, nos pontos próximos ao final do reator (Ponto 4 e Ponto 5), as espécies de microrganismos presentes apresentavam, visualmente, quantidades menores que nos outros pontos de coleta.

Quanto às morfologias presentes no reator, pode-se afirmar que não ocorreram variações, se comparadas com os resultados observados na amostra coletada anteriormente, quando o reator estava sendo operado a 47°C. Supõe-se que, acima de determinada faixa de temperatura, as mudanças na composição da microbiota devam ser mínimas, uma vez que as condições ambientais passam a ser

mais seletivas. Considerando-se que a faixa de temperatura mesofílica situa-se próxima a 35°C, acredita-se que a operação acima de 45°C tenha promovido a eliminação de grande parte dos microrganismos mesofílicos.

Na Tabela 21 apresentam-se os resultados da composição do gás do sistema no período de adaptação da microbiota. Pode-se observar que a produção de metano não sofre oscilações bruscas, apesar de o sistema ter sido submetido ao aumento contínuo da temperatura.

Tabela 21 – Dados de Composição do Gás Obtidos no Período de Adaptação.

Data	Ar	CH ₄	CO ₂
25/09/98	47,21	48,66	4,13
29/09/98	16,73	73,75	9,52
01/10/98	7,90	56,18	35,92
05/10/98	46,79	50,10	3,11
08/10/98	18,88	68,83	12,29
09/10/98	19,25	69,83	10,92
13/10/98	12,16	72,22	15,62
16/10/98	8,48	67,86	23,66
18/10/98	5,37	45,91	48,72
21/10/98	26,18	57,90	15,92
26/10/98	26,35	33,81	39,84
27/10/98	8,87	26,90	69,18

A temperatura foi elevada, posteriormente, a 55°C e os resultados obtidos na análise microscópica da amostra então coletada foram semelhantes aos obtidos para a temperatura de 50°C.

Para finalizar esta fase do trabalho, foram realizadas análises utilizando-se os microscópicos ópticos e de varredura. As fotos obtidas estão apresentadas a seguir. Estão apresentadas as fotos da microscopia de varredura.



Figura 15 – Presença de Bacilos na Amostra (T= 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).

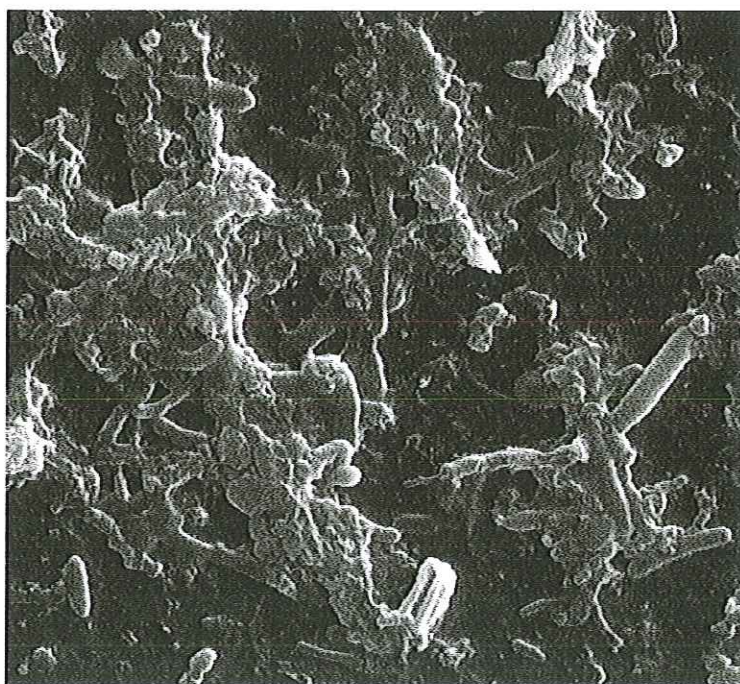


Figura 16 – Bacilos Segmentados (T= 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).

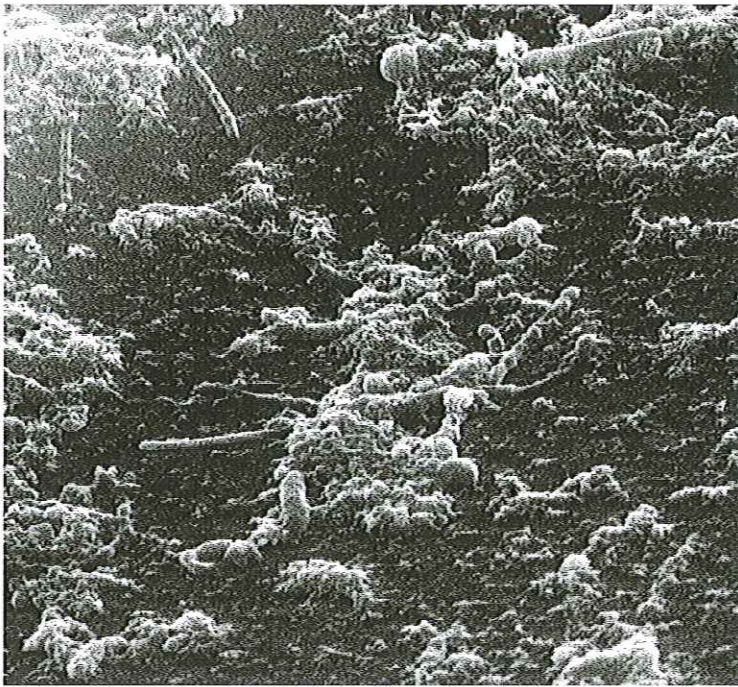


Figura 17 – Visão de Aglomerado de Bacilos (T= 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).

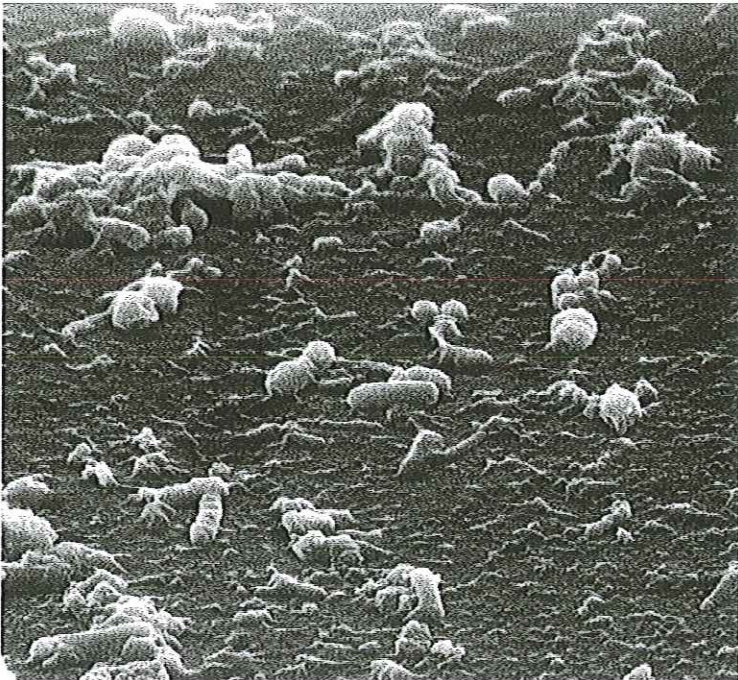


Figura 18 – Presença de Bacilos e Cocos (T= 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).



Figura 19 – Bacilo Curvo (T= 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).

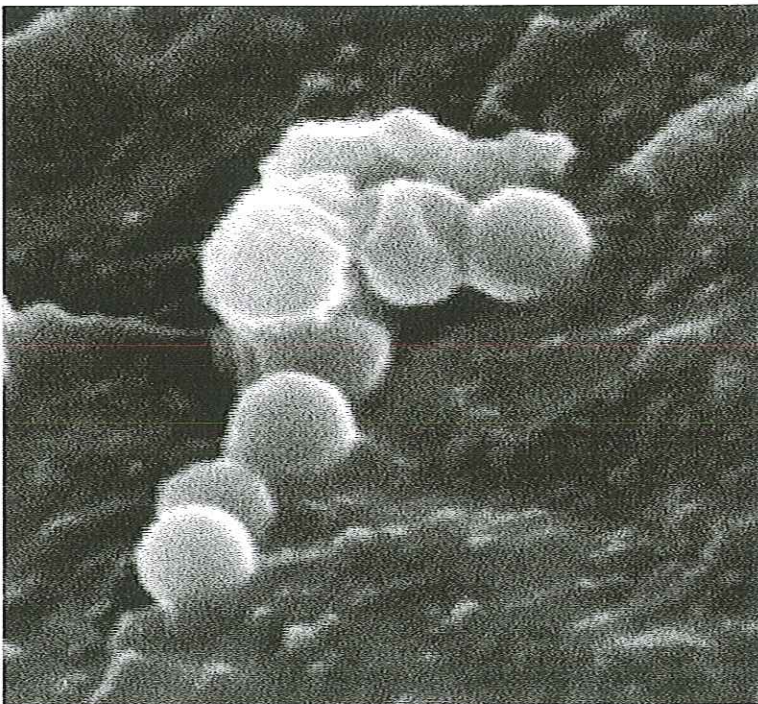


Figura 20 – Presença de Cocos na Amostra (T= 55°C, microscopia de varredura, ampliação de 5000 vezes).

5.3 – Operação do Reator.

Nesta etapa de operação do reator, a temperatura de trabalho foi de 55°C, iniciando-se a etapa de verificação da eficiência do reator em tratar vinhaça em condições termofílicas.

Neste período de operação do reator, a DQO do afluente foi mantida em torno de 20.000 mg/l. Com estes valores, observou-se que, em circuito aberto, ocorria o aumento da alcalinidade a ácidos voláteis e ácidos orgânicos voláteis, com diminuição da alcalinidade a bicarbonatos, indicando a ocorrência de desequilíbrio no processo, constatando-se o início do processo de acidificação do reator.

Para evitar que esse problema tornasse o processo de acidificação irreversível, a DQO de entrada foi diminuída pela metade, mantendo-se em, aproximadamente, 10.000 mg/l. Com essa mudança, observou-se a produção de alcalinidade a bicarbonatos com conseqüente diminuição dos ácidos orgânicos voláteis e alcalinidade a ácidos.

Tabela 21 – Dados Obtidos no Monitoramento do Afluente na Operação do Reator.

Tempo (dias)	pH	Alc. Total	Alc. a Bic.	Alc. a AV	AOV	DQO não filtrada	DQO filtrada
1	8,3	10189,5	5747,9	4441,6	6623,9	19947	19215
10	7,9	3242,7	2130,9	1111,8	1414,2	14650	13980
20	8,2	3175,2	1542,2	1632,9	2172,6	10637	9925
21	7,7	3178,8	2003,1	1175,7	1581,5	10612	9896
22	8,1	3335,4	1667,7	1667,7	2218,8	10276	9182
34	7,7	3309,4	1654,7	1654,7	2039,9	10662	9427
49	7,9	3135,2	1306,4	1828,9	2498,3	9565	8613
64	7,9	3135,2	1480,5	1654,7	870,9	10687	9162

Tabela 22 – Dados Obtidos no Monitoramento do Efluente na Operação do Reator.

Tempo (dias)	pH	Alc. Total	Alc. a Bic.	Alc. a AV	AOV	DQO não filtrada	DQO filtrada
1	8,4	12018,4	6531,8	5486,7	7792,8	17732	17275
10	8,4	7547,8	4064,2	3483,6	4354,8	9850	9220
20	8,1	4259,8	2461,2	1798,6	1781,3	7112	6450
21	8,1	4354,5	2699,8	1654,7	2085,7	6450	6375
22	8,0	4180,3	2438,5	1741,8	2062,8	6356	6233
34	8,0	4180,3	2351,4	1828,9	2177,4	6870	6528
49	8,1	4267,4	3222,3	1045,1	1031,4	3485	3335
64	8,1	4180,3	3396,5	783,8	779,3	3375	2875

Tabela 23 – Eficiência de Remoção da DQO Filtrada.

Tempo (dias)	DQO Afluente	DQO Efluente	% de remoção de DQO
1	19215	17275	10,10
10	13980	9220	34,0
20	9925	6450	35,0
21	9896	6375	35,6
22	9182	6233	32,1
34	9427	6528	30,80
49	8613	3335	61,3
64	9162	2875	68,6

De posse dos dados das Tabelas 21, 22 e 23, foram construídos gráficos para melhor visualização dos dados, apresentados nas Figuras 21 a .

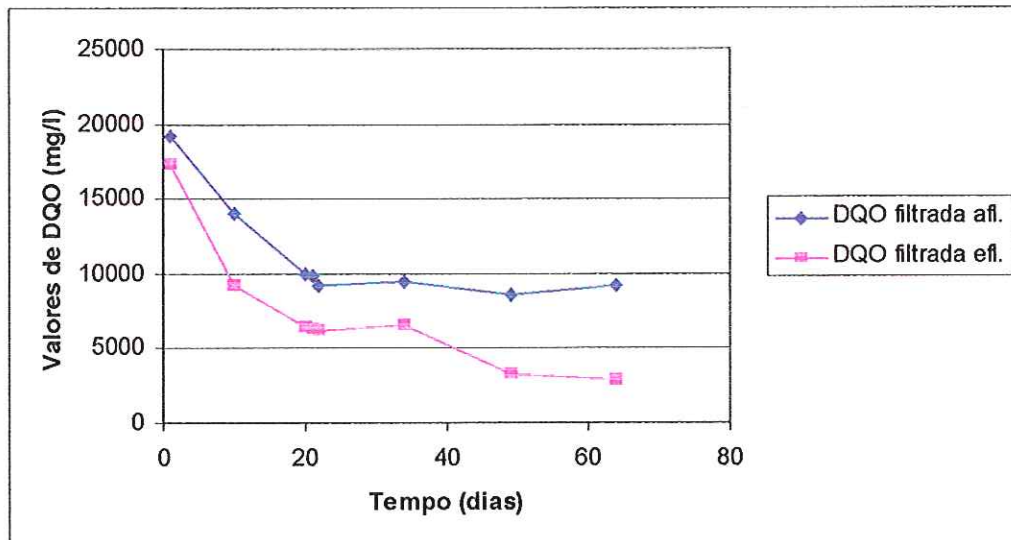


Figura 21 – Dados Comparativos de DQO filtrada – Operação.

Inicialmente a remoção de DQO foi menor, mas, com o passar do tempo, a eficiência do reator aumentou. Esse resultado permite concluir que o reator estava operando na faixa de temperatura desejada e com a eficiência esperada.

Verifica-se que as maiores remoções de DQO ocorreram quando os valores de entrada encontravam-se na faixa de 10000 mg/l.

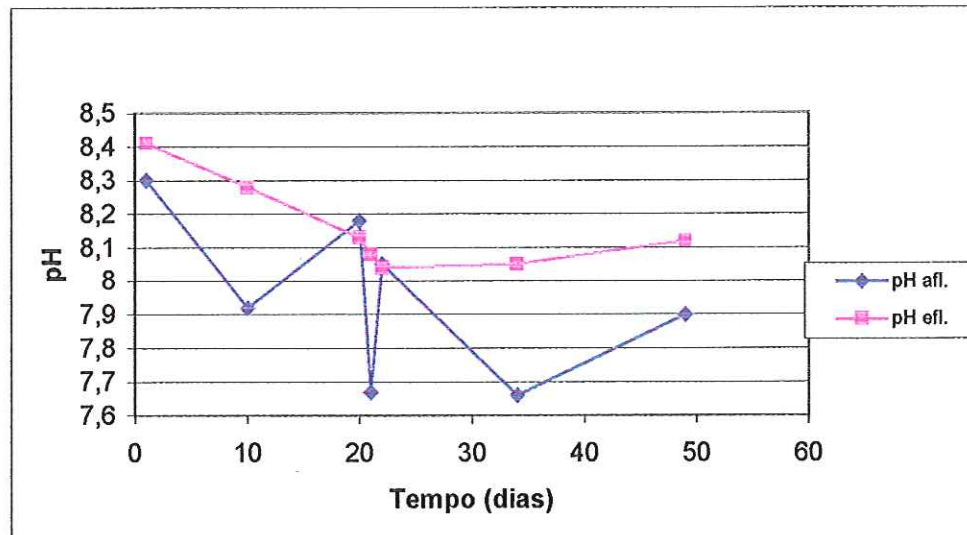


Figura 22 – Dados comparativos de pH – Operação.

Quanto aos valores de pH obtidos no experimento, verifica-se que há um aumento no pH no efluente do reator, mostrando que o mesmo está produzindo alcalinidade. Esse fato pode ser comprovado ao se observar a Figura 23.

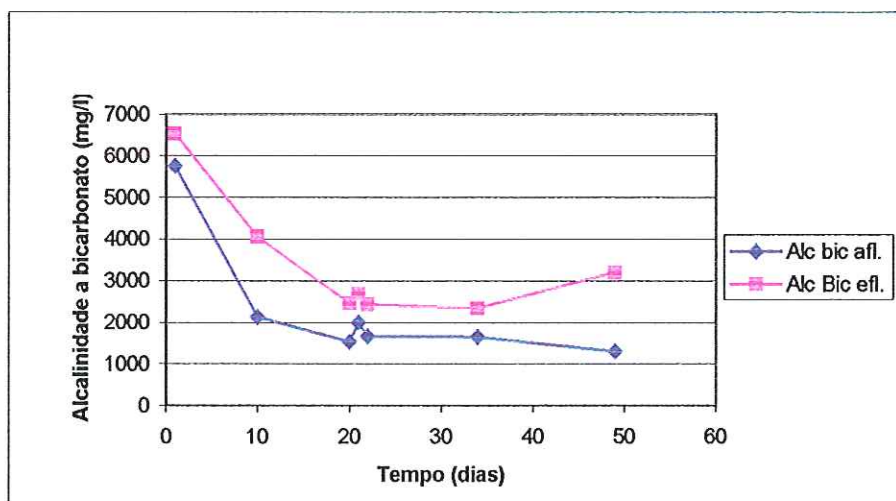


Figura 23 – Dados Comparativos de Alcalinidade a Bicarbonato – Operação.

Segundo a Figura 23, verifica-se que a alcalinidade no efluente se mantém sempre acima da alcalinidade do afluente, demonstrando que o reator está em equilíbrio e produzindo alcalinidade a bicarbonatos.

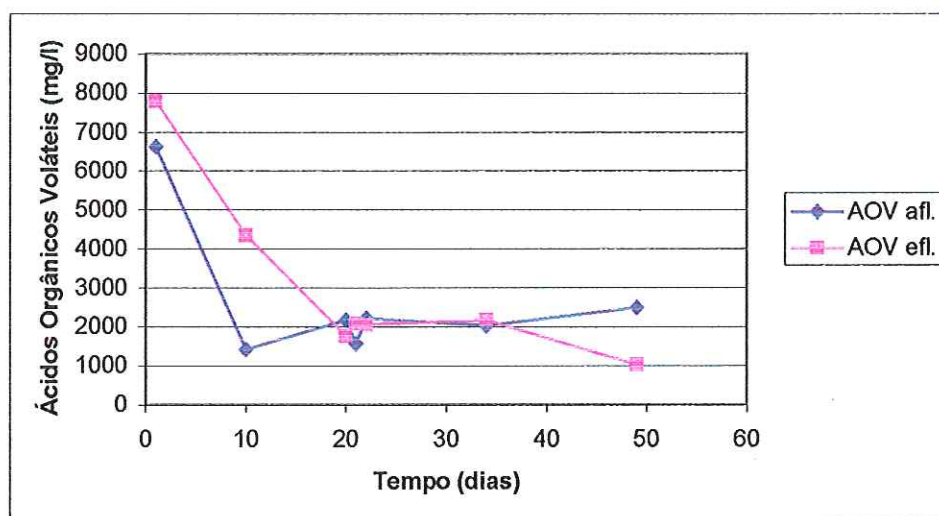


Figura 24 – Dados Comparativos de Ácidos Orgânicos Voláteis – Operação.

Inicialmente os valores de ácidos voláteis eram superiores no efluente que no afluente. Com o passar do tempo, o sistema entrou em equilíbrio e verifica-se que a quantidade de ácidos voláteis presentes no sistema diminuiu.

Tabela 24 – Composição do Gás em Amostras Gasosas Coletadas no Período de Partida do Reator em Circuito Aberto, em Porcentagem.

Data	Ar	Metano	CO ₂
1	37,18	32,16	30,65
2	38,77	46,33	14,89
3	41,89	53,34	4,76
16	42,89	38,81	18,29
18	28,66	32,66	38,67
20	56,85	25,66	17,49
23	21,13	45,38	33,49
29	20,58	57,91	21,51
39	22,99	61,26	15,74
48	10,56	59,01	30,42
56	3,35	63,16	33,48

A porcentagem de remoção de DQO, após a redução da DQO do efluente aumentou com o passar do tempo, até que se obtiveram valores próximos dos esperados, em torno de 70%. Observa-se, na Tabela 23, que o valor final obtido foi de 68%.

Pela análise da cromatografia gasosa das amostras coletadas no período, observa-se que a porcentagem de metano vai aumentando com o tempo de operação do reator e com o aumento de eficiência de remoção da DQO do afluente.

Souza (1991) obteve eficiência de remoção de DQO de 72% e porcentagem de metano no gás de 60%, operando reator UASB submetido a cargas orgânicas de 25 a 30 Kg DQO/m³ de reator dia, para o tempo de detenção hidráulica de 10,8 horas. No presente trabalho, a remoção de DQO foi de 70% para DQO de entrada de 10.000 mg/l e tempo de detenção hidráulica de 26 horas, obtendo-se 63% de metano no gás. Não podemos afirmar que os resultados foram similares, pois o volume de escoamento de um reator UASB é diferente de um reator tubular. Deve-se destacar, no entanto, que este trabalho não pode ser considerado completo, pois o tempo de operação do reator em condições estáveis foi muito pequeno, comparado com o estudo realizado por Souza (1991). Dado o curto período de tempo em que o reator RAHLF foi operado, incluindo-se o período de adaptação do lodo à temperatura na

faixa termofílica, os resultados podem ser considerados satisfatórios e abrem a perspectiva de utilização dessa configuração de reator no tratamento de vinhaça.

Por se tratar de um estudo preliminar e de natureza exploratória sobre o potencial de uso do reator RAHLF para tratamento de vinhaça em condições termofílicas, os resultados obtidos podem ser considerados importantes no que diz respeito às perspectivas de desenvolvimento no futuro. Um estudo mais completo poderia contemplar variações no tempo de detenção hidráulica e na carga orgânica aplicada, assim como a operação com recirculação parcial do efluente para diminuir o impacto das cargas orgânicas elevadas nos primeiros segmentos do reator tubular.

6 – CONCLUSÕES

Foi constatada a viabilidade do tratamento de vinhaça em reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF), sob condições termofílicas, a partir da adaptação de lodo mesofílico.

Demonstrou-se a viabilidade da adaptação do lodo mesofílico, após o período inicial de partida, através do aumento gradativo da temperatura no interior da câmara em que o reator estava instalado, até a temperatura de 55°C.

Na caracterização da microbiota observaram-se mudanças, como consequência do aumento a temperatura. Com a temperatura de 40° C observou-se a diminuição da quantidade de bacilos grandes e o aumento de bacilos pequenos. Quanto aos cocos, não ocorreu variação significativa nas suas quantidades. Nessas amostras, observou-se o aparecimento de filamentos longos e delgados e alguns filamentos semelhantes a *Methanotrix* sp. Esses fatos demonstraram a seleção natural da microbiota de acordo com a temperatura.

A fase inicial de partida do reator com DQO afluente de 20 g/l mostrou-se inviável, provavelmente devido à configuração tubular do reator. Para águas residuárias concentradas, ocorre sobrecarga orgânica nos primeiros segmentos do reator, a qual impede o estabelecimento de equilíbrio entre as fases acidogênicas e metanogênicas da digestão anaeróbia. Condições de estabilidade do processo de tratamento na partida foram obtidas somente a partir da aplicação de afluente com DQO de 10 g/l e operação em circuito fechado.

A inadequação do reator ao tratamento de vinhaça com DQO de 20 g/l foi constatada também ao se operar o reator a 55 °C, em circuito aberto, após a completa adaptação do lodo a essa temperatura.

Condições estáveis de operação foram obtidas para a DQO afluente de 10 g/l e tempo de detenção hidráulica de 26 horas. Nessas condições, a remoção média de DQO ao final do experimento era da ordem de 70% e a porcentagem de metano no gás era de 63%.

7 - SUGESTÕES

O presente trabalho nos mostrou a viabilidade do uso desta nova configuração de reator para o tratamento de efluentes em condições termofílicas, mas para um melhor desenvolvimento do mesmo são necessários alguns dados complementares, que não foram possíveis de obter neste trabalho. Entre eles podemos citar:

- Estudo viabilidade de recirculação total ou parcial do efluente no sistema, ou seja, o uso de determinada taxa de recirculação do efluente, visando aumentar a eficiência de remoção da DQO;
- Influência dos valores de DQO na eficiência de remoção da mesma, avaliação dos melhores valores para obter maior remoção, ou seja, valores acima de 70%;
- Continuação do trabalho visando estabelecer parâmetros relacionando Tempo de Detenção Hidráulica versus carga orgânica do reator, otimizando o uso do reator.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA; AWWA; WPCF (1985) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16th edition, American Public Health Association, Washington.
- BROCK, T. D. (1994) Biology of microorganisms. Seventh edition. Editora Prentice Hall.
- CABRAL, A.K.A.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. (1995) "Caracterização hidrodinâmica de um reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF)", anais do XXII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (COBRASP), no prelo.
- CENTURIÓN, R. E. B.; MORAES, V. A. ; PERCEBON, C. M.; RUIZ, R. T. (1983) "Destinação Final da Vinhaça Produzida por Destilarias de Álcool. Revista DAE Nº 134, p. 107-112.
- CRUZ, R. L. (1991) "Efeito da Aplicação da Vinhaça sobre o Solo e Água Subterrânea", Tese de Doutorado apresentada ao SHS/EESC/USP, São Carlos, SP.
- FORESTI, E.; ZAIAT, M.; CABRAL, A.K.A.; DEL NERY, V. (1995) Horizontal-Flow Anaerobic Immobilized Sludge (HAIS) Reactor for Paper Industry Wastewater Treatment, 50th Annual Purdue Industrial Waste Conference, West Lafayette, In, USA e Brazilian Journal of Chemical Engineering **12**:235-239.
- MOSEY, F. E. (1982) "New Developments in the Anaerobic Treatment of Industrial Wastes", Water Pollution Control, 81(4), p. 540-552.
- SATTO, J. (1994) "Caracterização Hidráulica do Transporte de vinhaça em Tubulações", Tese de Doutorado apresentada ao SHS/EESC/USP, São Carlos, SP.

- SOUZA, M. E. (1982) "Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia", V Simpósio Nacional de Fermentação, Viçosa, MG.
- SOUZA, M. E.; FUZARO, G.; POLEGATO, A R. (1991) "Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor", Sixth International Symposium on Anaerobic Digestion, p. 191-200, São Paulo, Brasil.
- VAN HAANDEL, A C.; CATUNDA, P. F. C. (1994) "Profitability increase of alcohol distilleries by the rational use of byproducts", Water Science and Technology, V. 29, N° 8, p. 117-124.
- VAZOLLER, R. F. (1991) "Microbiologia da Digestão Anaeróbia" Seminário apresentado na disciplina de Biologia do Tratamento de Esgotos, São Carlos, SP.
- VAZOLLER, R.F. (1995) "Avaliação de Ecosistema Microbiano de um Biodigestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo, Operado com Vinhaça sob Condições Termofílicas", Tese de Doutorado apresentada ao SHS/EESC/USP, São Carlos, SP.
- VELA, F.J.; FORESTI, E.; ZAIAT, M. (1995) "Estimativa de difusividade efetiva de substratos em partículas de bactérias anaeróbias imobilizadas", Anais do 1° Congresso Brasileiro de Engenharia Química - IC, pp. 34-37.
- VIEIRA, S. M. M., SOUZA, M. E. (1981) "Métodos Analíticos para o Acompanhamento da Biodigestão", Revista Energia, V. III, n° 15, p. 26-36.
- VIEIRA, L.G.T.; ZAIAT, M.; FORESTI, E.; HOKKA, C.O. (1996) Estimativa de Parâmetros Cinéticos Intrínsecos em Sistemas Contendo Bactérias Anaeróbias Imobilizadas para Tratamento de Águas Residuárias, aceito para publicação no periódico *Biotechnology Techniques* em julho de 1996.

- VIEIRA, L. G. T. (1996) "Estimativa de Parâmetros Cinéticos Intrínsecos de Utilização de Substrato por Lodo Anaeróbio Imobilizado", Dissertação (Mestrado) apresentada ao SHS/EESC/USP, São Carlos, SP.
- ZAIAT, M.; CABRAL, A.K.A.; FORESTI, E. (1994) Reator Anaeróbio de Leito Fixo para Tratamento de Águas Residuárias: Concepção e Avaliação Preliminar de Desempenho, Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Engenharia Química, **11**: 33-42.
- ZAIAT, M.; CABRAL, A.K.A.; FORESTI, E. (1996) "Cell wash-out and external mass transfer resistance in horizontal-flow anaerobic immobilized sludge (HAIS) reactor", aceito para publicação no periódico Water Research em abril de 1996.
- ZAIAT, M.; VIEIRA, L.G.T.; FORESTI, E. (1996) "Liquid-Phase Mass Transfer in Fixed Bed of Polyurethane Foam Matrices Containing Immobilized Anaerobic Sludge", Biotechnology Techniques **10**: 121-126.
- ZAIAT, M. (1996) "Desenvolvimento de Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo (RAHLF) para Tratamento de Águas Residuárias", Tese de Doutorado apresentada ao SHS/EESC/USP, São Carlos, SP.
- ZAIAT, M.; VIEIRA, L.G.T.; FORESTI, E. (1997) "Intrinsic kinetic parameters of substrate utilization by immobilized anaerobic sludge", aceito para publicação no periódico Biotechnology and Bioengineering em julho de 1996.