**APROVEITAMENTO DO SORO DE
QUEIJO PARA PRODUÇÃO DE
METANO**

MELANIA PALERMO MANFRON
FARMACÊUTICA BIOQUÍMICA

Orientador: Prof. Dr. ANTONIO JOAQUIM DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz de
Queiroz", da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de con-
centração: Ciência e Tecnologia
de Alimentos.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Novembro de 1989

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Manfron, Melânia Palermo

M276a Aproveitamento do soro de queijo para produção de
metano. Piracicaba, 1989.
97p. ilus.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Bactéria anaeróbica - Comportamento 2. Biodi-
gestor 3. Biogás - Produção 4. Digestão anaeróbica
5. Metano - Produção 6. Soro de queijo - Digestão
anaeróbica. I. Escola Superior de Agricultura Luiz
de Queiroz, Piracicaba

CDD 665.776

APROVEITAMENTO DO SORO DE
QUEIJO PARA PRODUÇÃO DE
METANO

MELANIA PALERMO MANFRON

Aprovada em: 05.03.1990

Comissão julgadora:

Prof.Dr. Antonio Joaquim de Oliveira

ESALQ/USP

Prof.Dr.Wilson Roberto Soares Mattos

ESALQ/USP

Prof.Dr.João Gustavo Brasil Caruso

ESALQ/USP

Prof.Dr. Antonio Joaquim de Oliveira

In memoriam de meu pai Francisco e à
minha mãe Jeni, que com muita dedi-
cação souberam mostrar-me os cami-
nhos, dando-me com prazer tudo aquilo
que não possuíram, além do carinho,
dedicação e estímulo.

Ao Paulo, que com confiança
e companheirismo sempre es-
teve ao meu lado para que
eu pudesse escolher as me-
lhores soluções para os
problemas.

Aos meus filhos Fernando, Rafael
e Maurício, que são a razão de
todos os esforços.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Antonio Joaquim de Oliveira, pela compreensão, orientação e amizade, que contribuíram para minha formação;
- Aos professores do Departamento de Tecnologia Rural que, com esforço e amizade, contribuíram para a transferência de experiência e conhecimento.
- Ao Prof. Valduino Estefanel, pelo auxílio e amizade.
- Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, pela convivência sadia
- A BRASMETANO, Tecnologia Integrada, na pessoa de José Marcos Gryschek.
- Aos funcionários Cleomar M. Crvalho e Luiz Lucatti, pela ajuda no experimento, em sua parte de análise laboratorial.
- A Universidade Federal de Santa Maria e à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", pela oportunidade de realização do curso.
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

Em especial, agradeço à Marta Diana Weimann Braunbeck e família pela amizade, companheirismo e incentivo durante toda a nossa convivência.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	xi
SUMMARY	xiv
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	06
2.1. Aspectos gerais da Produção de metano	06
2.2. Princípios da fermentação metânica	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1. Materiais	25
3.1.1. Substrato	25
3.1.2. Inóculo	26
3.1.3. Biodigestores	26
3.2. Métodos	30
3.2.1. Condições gerais do experimento	30
3.2.2. Condução do experimento	31
3.2.2.1. Aclimação do inóculo	33
3.2.2.2. Operacionalidade dos biodi- gestores	34
3.2.3. Parâmetros Avaliados	35
3.2.3.1. pH	35
3.2.3.2. Volume de gases produzidos	35
3.2.3.3. Composição dos gases produ- zidos	36
3.2.3.4. Demanda Química de Oxigênio	36
3.2.4. Determinações Complementares	38
3.2.4.1. Teor de Sólidos Totais (ST%)	38
3.2.4.2. Contagem do número de Bac- térias Anaeróbicas (NB)....	39
3.2.4.3. Determinação de Açúcares Redutores Totais (ART%) ...	39
3.2.5. Metodologia estatística	40

	Página
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1. Adaptação do inóculo e período de estabilização dos biodigestores	41
4.1.1. Biodigestores alimentados com soro de queijo sem correção de pH	42
4.2. Parâmetros de acompanhamento e controle do experimento	44
4.2.1. Parâmetros para avaliação	44
4.2.1.1. Variação do pH na digestão anaeróbica do soro de queijo	44
4.2.1.2. Percentual de metano e outros gases no biogás produzido	48
4.2.1.3. Carga orgânica adicionada e eficiência da digestão anaeróbica do soro de queijo em relação à remoção de DQO ..	56
4.2.2. Parâmetros adicionais	60
4.2.2.1. Número de bactérias anaeróbicas contidos no efluente versus o Teor de Sólidos Totais e Açúcares Redutores Totais	60
4.3. Considerações Gerais	63
5. CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICE	82

LISTA DE FIGURAS

FIGURA Nº		Página
1	Esquema de dois estágios da digestão anaeróbica	15
2	Esquema de três estágios da digestão anaeróbica	18
3	Esquema de quatro estágios da digestão anaeróbica	19
4	Vista dos biodigestores anaeróbicos utilizados no experimento	27
5	Características do biodigestor utilizado no experimento para a digestão anaeróbica do soro de queijo	28
6	Vista dos gasômetros utilizados no experimento	30
7	Esquema de um sistema operacional completo utilizado no experimento	32
8	Leituras diárias de pH para seis biodigestores mantidos à 35°C, em cinco tempos de retenção	45
9	Modelo de regressão logarítmico para as variáveis pH (y) e concentração (x), considerando os cinco sistemas de alimentação dos biodigestores	47
10	Produção de biogás (---), teor de metano no biogás (---) em litros, e grama de DQO removida em função do tempo (---), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 1	49
11	Produção de biogás (---), teor de metano no biogás (---) em litros, e grama de DQO removida em função do tempo (---), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 2	50
12	Produção de biogás (---), teor de metano no biogás (---) em litros, e grama de DQO removida em função do tempo (---), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 3	51

FIGURA Nº

Página

13	Produção de biogás (---), teor de metano no biogás (---) em litros, e grama de DQO removida em função do tempo (---), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 4	52
14	Produção de biogás (---), teor de metano no biogás (---) em litros, e grama de DQO removida em função do tempo (---), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 5	53
15	Produção de biogás (---), teor de metano no biogás (---) em litros, e grama de DQO removida em função do tempo (---), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 6	54
16	Modelo de regressão quadrática para as variáveis volume de biogás produzido (y) e concentração (x) considerando os cinco sistemas de alimentação dos biodigestores.	57
17	Modelo de regressão linear para as variáveis número de bactérias anaeróbicas (y) e sólidos totais (x), considerando três concentrações e cinco sistemas de alimentação dos biodigestores	62

LISTA DE TABELAS

TABELA Nº		Página
1	Dados comparativos de um sistema aeróbico e um sistema anaeróbico	03
2	Valores característicos para diversos efluentes sem tratamento, dados em mg/l, através dos parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Teor de Sólidos em Suspensão (SS)	03
3	Características físico-químicas do soro de queijo utilizado como substrato no experimento	25
4	Valores de pH amostrados dos diversos volumes de inóculos dos biodigestores, antes da adição de soro, para as diversas concentrações estudadas	43
5	Sistemas de alimentação diária dos biodigestores, nos diversos tratamentos estudados, e as respectivas cargas orgânicas adicionadas	83
6	Valores de pH dos biodigestores mantidos à 35°C, para uma única alimentação diária na concentração de 1%.....	84
7	Valores de pH dos biodigestores mantidos à 35°C, para uma única alimentação diária na concentração de 5%.....	85
8	Valores de pH dos biodigestores mantidos à 35°C, para três alimentações diárias na concentração de 5%	86
9	Valores de pH dos biodigestores mantidos à 35°C, para oito alimentações diárias na concentração de 5%	87
10	Valores de pH dos biodigestores mantidos à 35°C, para cinco alimentações diárias na concentração de 10%	88

TABELA Nº

Página

11	Volume em litros da solução salina acidulada (Na_2SO_4 , 25% e H_2SO_4 , 5%), coletados diariamente, para os diversos tempos de retenção (TR) e concentrações (1%, 5% e 10%)	89
12	Volume em litros de metano (CH_4) contido nas amostras, coletadas diariamente nos biodigestores, para os diversos tempos de retenção (TR) e concentrações (1%, 5% e 10%)	90
13	Volume em litros de nitrogênio (N_2) e oxigênio contido nas amostras, coletadas diariamente nos biodigestores, para os diversos tempos de retenção (TR) e concentrações (1%, 5% e 10%)	91
14	Volume em litros de gás carbônico (CO_2) contido nas amostras, coletadas diariamente nos biodigestores, para os diversos tempos de retenção (TR) e concentrações (1%, 5% e 10%)	92
15	Remoção de DQO obtida na digestão anaeróbica do soro de queijo utilizando diferentes cargas orgânicas diárias nos biodigestores, em escala laboratorial	93
16	Teor de Sólidos Totais (ST) em porcentagem, dos efluentes dos sistemas operacionais, para cada concentração e sistema de alimentação	94
17	Número médio de bactérias anaeróbicas (NB) presentes nos efluentes dos biodigestores, para cada concentração e sistema de alimentação	95
18	Teor de Açúcares Redutores (ART) em porcentagem, de amostras dos efluentes dos sistemas operacionais, para cada concentração e sistema de alimentação	96
19	Análise de variância de alguns fatores, considerando um experimento inteiramente casualizado em relação ao sistema de alimentação dos biodigestores	97

APROVEITAMENTO DO SORO DE QUEIJO PARA PRODUÇÃO DE METANO

Autora: MELÂNIA PALERMO MANFRON

Orientador: Prof. Dr. Antonio Joaquim de Oliveira

RESUMO

O presente experimento foi conduzido no Departamento de Tecnologia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, na cidade de Piracicaba, SP.

O objetivo deste trabalho foi o de estudar a viabilidade da produção de metano através da utilização do soro oriundo da fabricação de queijos, bem como avaliar o comportamento das bactérias metanogênicas.

O experimento foi desenvolvido num período de 65 dias, nos quais os primeiros 30 dias foram utilizados para aclimação do inóculo, para evitar a influência deste sobre os tratamentos. Os biodigestores foram tratados com soro de queijo, sem correção de pH, nas concentrações de 1%, 5% e 10% do seu volume nominal e mantidos à 35°C. A

carga máxima de 1,3; 5,4 e 10,3 g DQO/dia foi adicionada à cada biodigestor, nos respectivos tempos de retenção.

Foram utilizados cinco tempos de retenção e quatro sistemas de alimentação para tempos diferentes de adição de substrato. No 1º TR e no 2º TR, a alimentação foi adicionada nos biodigestores em intervalos de 24 horas. No 3º TR a carga foi dividida em três alimentações e adicionada aos biodigestores em intervalos de 8 horas. No 4º TR foram realizadas oito alimentações diárias dos biodigestores, em intervalos constantes de 2 horas. No 5º TR a carga orgânica foi dividida em cinco alimentações diárias dos biodigestores, em intervalos de 3 horas e 36 minutos.

Para avaliação da digestão anaeróbica nesses biodigestores semicontínuos, foram realizadas análises dos parâmetros pH, teor de sólidos totais, número de bactérias anaeróbicas presentes no efluente, açúcares redutores, análise de DQO e a medição do volume de biogás produzido.

Os resultados do presente trabalho mostram que as condições de anaerobiose foram afetadas pelos sistemas de alimentação dos biodigestores, mas que foi possível tratar os resíduos de indústria de laticínios, como o soro de queijo, por digestão anaeróbica, com produção de biogás. A máxima produção de metano foi obtida na concentração de 5% para o sistema de três alimentações

diárias mas não houve, estatisticamente, diferença significativa para os demais tratamentos.

UTILIZATION OF CHEESE WHEY TO PRODUCE METHANE

Author: MELANIA PALERMO MANFRON

Adviser: Prof. Dr. ANTONIO JOAQUIM DE OLIVEIRA

SUMMARY

This experiment was carried out at "Departamento de Tecnologia Rural", "Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz", University of São Paulo, in Piracicaba, São Paulo, Brazil.

Its objective was to study the viability of methane production through the utilization of whey from cheese manufacture and, also, to evaluate the behaviour of methanogenic bacteria. The period of the experiment was 65 days, being 30 days used to acclimatization of the inoculum, in order to avoid its influence on treatments. Biodigestors were treated with cheese whey (concentrations of 1%, 5% and 10% of the nominal volume), without adjust of pH and maintained at 35°C. A maximum load of 1.3, 5.4 and 10.3g COD/day was put into each biodigester in the respective retention times.

Five retention times and four feeding systems were used for different times of substrate addition. In the first and second retention times,

biodigestors were feed at intervals of 24 hours. In the third retention time, the load was divided in three parts and put into biodigestors at each 8 hours. In the fourth retention time, biodigestors received 8 daily feeding, at regular intervals of 2 hours.

For the fifth retention time, the organic load was divided in five daily feeds that were put into biodigestors at intervals of 3 hours and 36 minutes.

To evaluate the anaerobic digestion in these semi-continuous biodigestors, analyses of the following parameters were made: pH, amount of total solids, number of anaerobic bacteria in the effluent, reducing sugars, chemical oxygen demand (COD) and measurement of produced biogas volume.

Results of this work showed that the anaerobic conditions were affected by the feeding systems of biodigestors, but it was possible to treat the dairying residues, as the cheese whey, by using anaerobic digestion with production of biogas. The maximum production of methane was at the concentration of 5% for the system of

three daily feeds, but there was no statistical significant difference for the other treatments.

1. INTRODUÇÃO

As reações químicas que ocorrem no meio ambiente, devido à adição de contaminantes por despejos de resíduos industriais, constituem um sério problema em termos de poluição ambiental. Estas reações são fenômenos que individualmente apresentam causas e efeitos, um dualismo que frequentemente passa despercebido.

As indústrias são as responsáveis pela maioria das substâncias que causam a poluição da água, que se processa num ritmo mais acentuado que a poluição do ar. No caso específico de indústrias de alimentos, tem-se uma fonte de poluição bastante importante, pois são geradas significativas quantidades de resíduos sólidos e líquidos (VAREL et alii, 1980; MOSEY, 1981; KANTEREWICZ et alii, 1985). Nestes descartes encontram-se açúcares e amidos em grandes quantidades, que ao alcançarem cursos d'água, ou mesmo o lençol freático, exigem substancial demanda de oxigênio para a recuperação do meio, tornando o processo problemático e oneroso, pois a difusão de ar requer sofisticados aparatos e grande demanda de energia (MOSEY, 1981).

A biodigestão anaeróbica é um dos métodos para tratamento de resíduos poluidores, de origem orgânica, produzindo biogás e biofertilizantes, além de possuir um efluente com odor ameno, totalmente inofensivo. Este processo reduz o conteúdo orgânico de resíduos fortemente poluidores, com DBO maior que 100.000 mg/l, a um custo menor, alcançando 1/4 do valor correspondente a um sistema aeróbico quando a DBO for de 20.000 mg/l, chegando a reduzir de 70 a 90% a carga de DBO, e em 60% a DBO do efluente (NOGUEIRA, 1986). Na tabela 1, verifica-se dados comparativos de um sistema aeróbico e de um sistema anaeróbico.

Para avaliação da poluição ambiental através do teor orgânico na água, pode-se utilizar basicamente três parâmetros, denominados de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Teor de Sólidos em Suspensão (SS).

O primeiro parâmetro (DBO) é a medida do oxigênio requerido para as bactérias decomporem a porção biodegradável da matéria, em um período pré-fixado de tempo (aproximadamente 5 dias). O segundo é a quantidade de oxigênio requerido para oxidar de forma total, quimicamente, a matéria orgânica, consumindo um tempo médio de 3,0 horas. O terceiro é a medida dos sólidos orgânicos em suspensão, que podem ser solubilizados sob ação bacteriana. A tabela 2 apresenta alguns valores característicos de diversos efluentes sem tratamento.

TABELA 1: Dados comparativos de um sistema aeróbico e de um sistema anaeróbico

Aspectos	Processo Aeróbico	Processo Anaeróbico
Características dos resíduos tratáveis sólidos	Baixo DBO 100 - 200 mg/l Baixo Teor de sólidos (= 9,5%)	Alto DBO 1000 - 100000 mg/l Alto teor de sólidos (2-20%)
Redução dos poluentes	DBO 80 - 95% DQO 70 - 90%	DBO 70 - 90% DQO 60%
Produção de lodo	Grande quantidade	Pequena quantidade
Remoção de nutrientes	Nitrogênio parcialmente reduzido	Não há
Energia	Consumidor	Produtor
Custo		
Instalação	Médio	Alto
Operação	Alto	Baixo

FONTE: NOGUEIRA, 1986.

TABELA 2: Valores característicos para diversos efluentes sem tratamento, dados em mg/l, através dos parâmetros "Demanda Bioquímica de Oxigênio" (DBO), "Demanda Química de Oxigênio" (DQO) e "Teor de Sólidos em Suspensão" (SS).

Resíduo	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	SS (mg/l)
Esgoto	200 - 400	300 - 600	100 - 400
Resíduos de laticínios	800 - 1500	1500 - 4000	500 - 600
Resíduos de fab. conservas	250 - 6000	500 - 15000	20 - 3500
Resíduos de matadouros	700 - 2000	2000 - 6000	600 - 11000
Resíduos rurais	500 - 60000	1000 - 150000	800 - 5000

FONTE: NOGUEIRA, 1986.

No caso específico do processo de industrialização do queijo, o soro produzido é um subproduto altamente poluidor, devido à sua difícil degradação, principalmente devido à lactose, responsável por 80% desta poluição, contra 20% das demais frações protéicas (FERRAT, 1980). A produção do soro depende basicamente da manufatura e do tipo de queijo produzido que corresponde, aproximadamente, a uma relação de 8 : 1, isto é, tem-se 8 litros de soro por Kg de queijo (BARFORD et alii, 1986; ZEIKUS, 1986). Estes dados têm reforçar os divulgados pelo Alfa-Laval Bulletin (1970) que, após a fabricação de 11887 Kg do queijo Saint Paulin (variedade Port Salut) e 7851 Kg do queijo Coulommiers (variedade camembert) foram obtidos, respectivamente, 80.000 Kg e 40.000 Kg de soro. Portanto, o soro pode se transformar em uma fonte de poluição bastante séria, uma vez que o seu DBO varia de 30.000 A 40.000 mg/l, ou seja, um equivalente habitante de 0,7 e uma DQO de 60.000 a 80.000 mg/l. (VIEIRA et alii, 1985).

O aproveitamento do soro, oriundo da elaboração de queijos ou caseína não é uma operação de fácil execução, dado ao grande volume de água a ser eliminada. Entretanto, o desenvolvimento de processos práticos e econômicos, que sejam viáveis na transformação deste subproduto é importante porque, além da produção de metano, ofereceria uma possibilidade de diminuir os riscos de poluição.

O presente trabalho visa estudar a viabilidade da produção de metano através da utilização do soro oriundo da fabricação de queijos, bem como avaliar o comportamento das bactérias metanogênicas, com a finalidade de obter dados visando a implantação de novos projetos em escala piloto e, posteriormente, em escala industrial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos Gerais da Produção de Metano

A digestão anaeróbica de compostos orgânicos para produção de gás, é uma das mais antigas formas de tratamento de dejetos, tendo sido utilizada, primeiramente, na estabilização e redução de odores em efluentes domésticos (MEYNELL, 1976a; COLLERAN et alii, 1982). Entretanto, poucas são as informações científicas atualmente disponíveis, com respeito aos níveis críticos de parâmetros químicos, físicos e microbiológicos, bem como a respeito dos níveis de tolerância a um bom desenvolvimento dos processos fermentativos (SAMPAIO, 1984; CEREDA et alii, 1986). Contudo, não se pode negar a importância da fermentação metanogênica na natureza, principalmente no tocante ao papel que representa no ciclo do carbono (VAN DER BERG, 1980; CRAVEIRO, 1982a; PERES, 1982; WILLIAMS & CRAWFORD, 1984), isto porque o metano é um produto muito comum e abundante na decomposição anaeróbica de compostos orgânicos (BAKER, 1956).

GIERUSZCZAK (1975), usando o método de pirogenação, a uma temperatura de 1327°C, verificou que uma tonelada de lixo sólido urbano ocasionou uma produção

aproximada de 510.000 m³ de gás, 0.43 m³ de líquido, 11.0 Kg de sulfato de amônio, 0.002 m³ de alcatrão e 70.0 Kg de carvão. É evidente que esta proporção varia consideravelmente, dependendo da temperatura empregada e da composição do lixo. Independentemente desta variação, entretanto, os gases obtidos são, principalmente, o hidrogênio, o monóxido de carbono, o metano e o etileno. Contudo, o metano resultante de uma digestão anaeróbica poderá alcançar um rendimento de 0,31 m³ por quilograma de material.

Para VILLEN et alii (1981), a limitação do emprego do tratamento anaeróbico para resíduos orgânicos de baixos conteúdos em sólidos, era uma consequência da necessidade de se operar com equipamentos de grandes dimensões, tornando inviável a prática desses sistemas anaeróbicos. A vinhaça oriunda de destilarias de álcool, que apresenta um tratamento realizado eficientemente em reatores anaeróbicos de fluxo ascendente e manta de lodo ("up flow sludge blanket reactor"), é um exemplo típico deste processo, operando com cargas orgânicas superiores a 10 Kg DBO/m³.dia (10g SV/1R x d), com tempo de residência de 1 dia (LETTINGA et alii, 1980; LETTINGA & VIKEN, 1978; VILLEN et alii, 1981).

VIEIRA & SOUZA (1981) relatam que, para a digestão anaeróbica de lodo de esgoto, concentrações de 50 - 150 mg/l de acidez volátil total, expressas em ácido acético, são consideradas adequadas e indicam um bom

desenvolvimento do processo. Para vinhaça, os mesmos autores citam níveis de até 1000 mg/l como aceitáveis. CRAVEIRO (1982b) e SOUZA (1982) afirmam que, com tamponamento adequado do meio, são toleráveis concentrações de 6.000 a 8.000 mg/l, sem causar a inibição do processo.

YOSHIDA & HOSHII (1979), verificando o valor nutritivo do resíduo da fermentação proveniente do estêrco de porco e de aves, concluíram que a energia metabolizável, para ambos os materiais, era nula e que o "GPV", valor de proteína bruta, foi de 38% para suínos e nula para aves.

NAAS (1979) relata que a produção de metano de resíduos de gado, quanto à quantidade e à qualidade do gás produzido, é influenciada pelo tipo de animal e manejo utilizados, e que a composição básica do produto é de 70% de CH_4 , 20% de CO_2 e com presença significativa de H_2S , O, N_2 e H_2 .

GÓMEZ et alii (1983) analisaram as condições microbiológicas do queijo Minas Frescal, comercializado em Lavras, MG, e verificaram a presença de microrganismos patogênicos que, segundo GALLO (1978) e SILVA et alii (1979), são comuns nestes produtos. Em 1986, COSTA & LACAVA estudaram a digestão anaeróbica neste tipo de queijo, sob diversas condições de cultura. A digestão do soro foi realizada em volumes de 50 ml, inoculados com mais de 5% de estêrco bovino digerido, sendo mantidos sob nitrogênio líquido (N_2) e submetidos a diferentes condições de pH e temperatura. As melhores condições de digestão obtidas

foram a temperatura de 37°C, principalmente com pH 6,2 nas concentrações de 10% e de 50% do soro.

ARAÚJO et alii (1986) também utilizaram o soro de queijo para a produção de biogás, com um tempo de retenção de 20 a 30 dias e uma temperatura de 36°C. Estes pesquisadores conseguiram atingir a produção de 1,1 litros de biogás por grama de sólidos voláteis, adicionados para uma carga máxima aplicada de 1,8 g de sólidos voláteis, por litro de biodigestor.

BARFORD et alii (1986) utilizaram uma carga máxima de 16,1 Kg DQO / m³.dia para uma digestão anaeróbica de soro de queijo, em escala laboratorial, e alcançaram uma remoção de DQO em torno de 99%, ao mesmo tempo que alcançaram um aumento de eficiência quando adicionaram floculantes químicos, com a finalidade de elevar a quantidade de biomassa.

LO & LIAO (1986) estudaram a produção de metano em escala laboratorial, a partir de soro de queijo, utilizando para isto um biodigestor rotatório de contato. A digestão do soro foi contínua à temperatura mesofílica de 35°C, para tempos de retenção que variaram de 11 a 5 dias. Devido ao alto teor orgânico do substrato, houve a necessidade de fazer diluição nos tempos de 5 dias. A produção de metano alcançada foi de 1,68 a 3,26 litros de CH₄ por litro de biogás.dia, com uma remoção de 76 a 93% de DQO.

HICKEY & OWENS (1980), utilizando biodigestores de leite fluidizado para estudar a digestão do soro, conseguiram reduzir 83,6% de DQO, utilizando 13,4 Kg DQO/m³.dia num tempo de retenção de 1,4 dia. Em 1981, SUTTOW & LI, trabalhando com o mesmo tipo de biodigestor, conseguiram remover, aproximadamente, 82% de DQO para uma carga de soro de 5,3 a 7,4 Kg DQO/m³.dia.

BOENING & LARSEN (1982), utilizando biodigestores de leite fluidizado para estudar o tratamento do soro obtido da fabricação de caseína na digestão anaeróbica, mostraram que a eficiência da remoção do material orgânico diminui com o aumento da carga de DQO de alimentação. A temperatura mesofílica utilizada foi de 35°C para cargas adicionadas de substrato de 7,7 Kg DQO/m³.dia e 19,5 Kg DQO/m³.dia, alcançando uma eficiência de, respectivamente, 90% e 70% na remoção de DQO. Em 1986, BARFORD et alii obtiveram uma remoção de 72% de DQO, quando adicionaram ao biodigestor 37,6 Kg DQO/m³.dia, para um tempo de retenção de 4,9 dias.

A digestão anaeróbica vem mostrando ser eficiente no processo de remoção da DQO do material orgânico, principalmente no tratamento de resíduos industriais de laticínios, que apresentam altos teores de materiais orgânicos. Verifica-se, também, que sua eficiência está diretamente relacionada ao tipo de resíduo e ao tipo de biodigestor utilizados.

SCHROEDER (1977), citando diferentes autores, relata que com o uso do aquecimento e da agitação, houve um aumento na taxa de digestão dos biodigestores, o que vem corroborar o trabalho de HARISCHANDRA & SAVENA (1969) que, utilizando biodigestores com sistema de agitação, conseguiram reduzir 83% de DBO com uma carga de 2,92 Kg DBO/m³.dia.

FOLLMANN & MARKL (1979), utilizando uma carga de 5,6 Kg DBO/m³.dia em um biodigestor, em escala laboratorial, obtiveram uma redução de 98% de DBO do efluente centrifugado, para uma produção de 36,8 litros de biogás por litro de soro. Neste trabalho foram utilizados um período de estabilização de 35 dias, um pH 7,0 e um tempo de retenção de 12,5 dias.

Na verdade, o aproveitamento destes resíduos teve o seu grande impulso na crise energética de 1973 (NOGUEIRA, 1986), através do uso de substratos dos mais diversos efluentes, em uma digestão anaeróbica (MEYNELL, 1976 b; HILLS, 1980; LETTINGA et alii, 1980; VAN DEN BERG, 1980; BARBOSA, 1982; COLLERAN et alii, 1982; WILLIAMS & CRAWFORD, 1984; CEREDA et alii, 1986; LO & LIAO, 1986).

A estabilização de efluentes através de digestão anaeróbica, também é citada na literatura através do uso de inúmeros substratos, tais como os de destilarias de álcool (CRAVEIRO, 1981; BARBOSA, 1982; GONÇALVES, 1982), os de indústrias de alimentos (VAREL et alii, 1980; GARCIA BILBAO, 1981; CALLANDER & BARFORD, 1983; KANTEREWICZ et

alii, 1985), e outros (HEMENS et alii, 1962; CALZADA et alii, 1981; ROLZ et alii, 1982; URSINOS, 1982; ARAIN, 1983; SAMPAIO, 1984; MOTTA, 1985).

No Brasil, além do problema de poluição, a necessidade de buscar fontes energéticas de baixo custo, fator essencial em qualquer atividade produtiva, fez com que, em ambos os setores, rural e industrial, fossem testadas alternativas como a do biogás, através de estudos mais científicos sobre a fermentação metanogênica, com o objetivo precípua de obtenção de energia na forma de gás metano (BATISTA, 1981), visto que a maioria dos resíduos agrícolas e industriais servem como substratos à digestão anaeróbica (GONÇALVES, 1982).

2.2. Princípios da fermentação metânica

Para HUGHES (1980), citado por MOTTA (1985), os microrganismos anaeróbicos são considerados os seres vivos mais primitivos, datando de $3,5 \times 10^9$ anos, adaptados à atmosfera isenta de oxigênio e composta por nitrogênio, dióxido de carbono, argônio e vapor d'água, pelo fato de que as bactérias metanogênicas são consideradas extremamente sensíveis ao oxigênio (HUNGATE, 1966; PAYNTER & HUNGATE, 1968). Entretanto, algumas bactérias metanogênicas não morrem quando expostas ao ar (ZEHNDER & WEHRMANN, 1977) ou ao oxigênio (KIENER & LEISINGER, 1982; HUSER et alii, 1982). Ocorre que, em biodigestores

anaeróbicos, são pouco conhecidos os efeitos da presença de O_2 na produção de metano. Entretanto, SCOTT et alii (1983) verificaram que as bactérias metanogênicas podem ser reversivelmente inibidas pelo oxigênio nas substâncias, mas irreversivelmente inibidas em amostras de um biodigestor anaeróbico.

Em 1934, foi sugerida a "teoria da redução do dióxido de carbono", como aplicável à produção de metano de compostos orgânicos. A teoria postulava que compostos orgânicos fermentados são oxidados e que essa oxidação é associada à redução do dióxido de carbono para metano. O principal suporte dessa teoria foi a demonstração realizada por SOHNGEN (1910), a respeito da fermentação do hidrogênio, na presença de CO_2 para metano:

Diversas teorias têm sido propostas para elucidar o fenômeno fermentativo característico da digestão anaeróbica (BUSWELL & SOLLO, 1948; BUSWELL & MUELLER, 1952; BARKER, 1956; BRYANT, 1979; McINERNEY & BRYANT, 1980). Em todos os processos fermentativos existe uma complexa mistura de espécies microbianas distintas, porém sintroficamente arranjadas, e com alta especificidade por substratos definidos gerando, em contrapartida, produtos específicos e intercomplementares (BUSWELL & SOLLO, 1948; BUSWELL & MUELLER, 1952; BARKER, 1956; McCARTY, 1964; TOERIEN et alii, 1967; PERES, 1982; HUNGATE, 1982).

Por muitos anos, a digestão anaeróbica foi descrita como sendo um processo fermentativo de dois estágios (Fig. 1): um de formação de ácidos orgânicos e outro de produção de gases, principalmente de metano e gás carbônico (GOUZA, 1982; PERES, 1982; CRAVEIRO, 1982b). O primeiro estágio envolve bactérias fermentativas não metanogênicas na formação de ácidos, as quais obtêm energia para o seu crescimento através da hidrólise dos polímeros, que compõe a matéria orgânica, fermentando os produtos desta hidrólise e ácidos orgânicos, álcoois, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfetos. O segundo estágio envolve várias espécies de bactérias metanogênicas na formação de metano (CH_4), as quais obtêm energia para o seu crescimento catabolizando os produtos do primeiro estágio a gás carbônico (CO_2) e metano (CH_4), segundo BRYANT (1979). Já em 1965, BRYANT, estudando os caminhos da fermentação por bactérias, na formação do metano com substrato de vegetação em decomposição ou com celulose purificada, veio a confirmar o que foi estudado por BARKER (1956), que mostra que as bactérias anaeróbicas são responsáveis por sua formação, e que existem dois grupos gerais de bactérias envolvidas. Um grupo inclui as espécies formadoras de carboidratos e aminoácidos que produzem H_2 , CO_2 , ácidos de baixo peso molecular e álcoois. O segundo grupo constitui-se de bactérias metanogênicas que produzem metano a partir de muitos destes produtos.

FIGURA 1: Esquema de 2 estágios da digestão anaeróbica
FONTE: PERES (1982)

Os vários estudos sobre as interações metabólicas entre as bactérias fermentativas e entre estas e as metanobactérias, além das evidências de que estas bactérias não catabolizam ácidos orgânicos, exceto o fórmico e o acético, aliadas ainda à descoberta da importância da produção de H_2 na fermentação metanogênica, reforçaram a tese de que a proposição anterior de dois estágios não é satisfatória (McINERNEY & BRYANT, 1980).

A partir de então, verificou-se que as interações metabólicas entre as populações microbianas reforçam a importância do hidrogênio molecular (H_2), cuja concentração em vários ecossistemas regula as proporções dos produtos produzidos por bactérias fermentativas (BRYANT, 1979). Esse mesmo autor e DITCHFIELD (1986) citam que o hidrogênio molecular (H_2) é produzido a partir dos álcoois formados no primeiro estágio, e são oxidados a acetato ou outros ácidos carboxílicos. Os ácidos graxos de número par de átomos de carbono são oxidados através da oxidação a acetato e hidrogênio molecular (H_2), enquanto que os ácidos graxos de número ímpar de átomos de carbono formam acetato, propionato e hidrogênio molecular (H_2). Os microrganismos deste processo são os responsáveis pela redução de prótons e descarboxilam o propionato a acetato, gás carbônico e hidrogênio molecular (BRYANT, 1979; McINERNEY & BRYANT, 1980; BRYANT, 1981). Entretanto, os ácidos graxos de cadeia carbônica maior que o acético, particularmente o propionato e o butirato, são muito mais

importantes que o lactato e o etanol, como intermediários na digestão anaeróbica (PERES, 1982).

O terceiro estágio, apresentado na Figura 2, mostra o envolvimento das bactérias metanogênicas, as quais utilizam os produtos do primeiro e do segundo estágios, principalmente o hidrogênio molecular, o gás carbônico e/ou acetato, na produção de metano e gás carbônico (WOLFE, 1981; KUBIAK & DUBUIS, 1985). Contudo, os álcoois e ácidos orgânicos de cadeia carbônica maior que do acético não são catabolizados por metanobactérias (BRYANT, 1979).

Segundo PERES (1982), a partir da presença de uma quarta população microbiana em biodigestores, inúmeros estudos têm sido realizados, com o objetivo de caracterizar outros microrganismos, bem como elucidar o seu papel na sequência de reações da degradação anaeróbica da matéria orgânica. A inclusão de mais um estágio no esquema de digestão anaeróbica (Figura 3), além dos três postulados por BRYANT (1979), é proposta por vários autores (TOERIEN et alii, 1967; McINERNEY & BRYANT, 1980; Zeikus, 1980 citado por PERES, 1982), a partir da constatação de que são obtidos rendimentos em metano (CH_4), de 4 a 6% superiores ao rendimento teórico proposto por McCARTY (1964), quando se determina a quantidade de metano oriunda do acetato. Este novo estágio seria caracterizado por organismos que, a

Figura 2: Esquema de 3 estágios da digestão anaeróbica
 FONTE: Adaptado de BRYANT (1979)

Figura 3: Esquema de 4 estágios da digestão anaeróbica.
FONTE: Zeikus (1980), citado por FERES (1982).

partir da reação $\text{CO}_2 + \text{H}_2$, seriam capazes de gerar acetatos, denominados homoacetogênicos (McINERNEY & BRYANT, 1980; Zeikus, 1980 citado em PERES, 1982). Segundo PERES (1982),

os gêneros *Clostridium* e *Acetobacterium* têm sido os únicos reconhecidos, que se enquadram no grupo; apresentam um metabolismo mixotrófico e catabolizam tanto H_2/CO_2 como compostos de vários carbonos.

O que se pode depreender de tudo o que foi exposto, é que o estudo detalhado dos microrganismos interatuantes na degradação do substrato, apresenta grande valia para a compreensão e otimização de qualquer processo, bem como para o estudo analítico de alguns componentes das fermentações anaeróbicas. PERES (1982) menciona os principais parâmetros a serem analisados em qualquer sistema biológico e em um biodigestor - a temperatura, o pH, a composição da matéria orgânica, a taxa de alimentação e composição inorgânica do substrato. SOUZA (1982) explica ser extremamente importante manter a temperatura constante, e operar o biodigestor sem variações significativas.

A Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras - CAEEB (1981) apresenta como sendo regra geral, que as bactérias produtoras de ácido parecem ser resistentes às altas concentrações de ácidos voláteis, o que não ocorre com as bactérias metanogênicas que são inibidas. Estas bactérias podem existir em dois grupos: o primeiro é relativamente resistente à concentração de

ácidos voláteis, se multiplicando rapidamente. O segundo é sensível a essas concentrações, multiplicando-se mais lentamente, sendo o grupo de bactérias responsáveis pela conversão de certos ácidos voláteis. Segundo DITCHFIELD (1986), dos grupos de microrganismos encontrados nos biodigestores, as bactérias metanogênicas são realmente as mais susceptíveis às variações ambientais e as que possuem menores velocidades de crescimento. CAEEB (1981) afirma que a faixa de operação normal do processo de digestão anaeróbica da matéria orgânica, no caso do ácido acético, está entre 200 - 800 mg/l, para uma concentração máxima aproximada de 2000 mg de ácidos voláteis, por litro de substrato. Entretanto, o máximo de concentração tolerável poderá variar, dependendo da concentração de amônia e de alguns cátions presentes no substrato.

A faixa de temperatura para o crescimento das bactérias metanogênicas pode ocorrer dentro de uma faixa de 4°C a 75°C (SALLES FILHO, 1985), apesar de temperaturas inferiores a 15°C não serem empregadas na digestão anaeróbica, devido à ineficiência do processo, com taxas de conversão demasiadamente baixas (VAN VELSEN & LETTINGA, 1980). Nessas condições, a produção de metano apresenta duas situações: a fase mesofílica, onde o "ótimo" para crescimento estaria ao redor de 35°C - 40°C, e a fase termofílica, onde este "ótimo" se situaria ao redor de 50°C - 62°C (KEENAN & LA GREGA, 1976; FOHLAND, 1982; SOUZA, 1982; KUBIAK & DUBUIS, 1985). De um modo geral, CAEEB (1981)

cita como temperatura ótima para o processo de digestão anaeróbica 35°C, para uma amplitude térmica de 30°C a 37°C.

O pH é muito importante para o crescimento das bactérias metanogênicas, pois a concentração hidrogeniônica tem grande influência na atividade destas bactérias, sendo que a faixa ótima referida pela literatura encontra-se entre 6,4 e 7,2 (BARKER, 1956; KEENAN & LA GREGA, 1976; VAN VELSEN, 1979; VAN VELSEN & LETTINGA, 1980; VIEIRA & SOUZA, 1982; SOUZA, 1982; HUNGATE, 1982; PERES, 1982). Uma diminuição do pH pode resultar em uma elevação na concentração de ácidos graxos voláteis e, portanto, fazer ocorrer inibição da metanogênese. Para valores de pH elevados, acima de 8,0, existe uma acentuada redução da concentração de dióxido de carbono livre no meio, e uma maior formação de hidrogênio e amônia (BARKER, 1956). KEENAN & LA GREGA (1976) relatam que a alcalinidade em um biodigestor anaeróbico representa a expressão do poder tampão deste meio, através do qual são neutralizados os aumentos excessivos dos ácidos voláteis. SOUZA (1982) considera que, em biodigestores anaeróbicos, o maior problema consiste na queda do pH a valores inferiores a 6,8. Entretanto, em pH abaixo de 6,0 e acima de 8,0, a taxa de crescimento desses organismos cai bruscamente (PERES, 1982). O equilíbrio do pH é importante e, segundo KUBIAK & DUBUIS (1985), pode ser assegurado através dos bicarbonatos dissolvidos se a sua concentração for igual ou maior que

1500 mg/l, o que garante níveis adequados para a biodigestão.

Segundo a Association Pour La Promotion Industrie Agriculture - A.P.R.I.A. (1973), o soro de queijo é um dos mais importantes resíduos da indústria de laticínios utilizados como substrato para fermentação, cujo líquido apresenta teores de água que varia de 915 a 940 gramas por litro. A matéria seca corresponde, em média, a 0,7% do peso total do soro, com uma composição global aproximada em 100 gramas de: 70 a 80 gramas de lactose, 10 a 14 gramas de nitrogênio total, 7 a 12 gramas de matéria mineral, 1,5 a 4 gramas de ácido e 0,05 a 0,6 gramas de matéria gordurosa. Isso mostra que a composição desse substrato apresenta um elevado teor de lactose e também de açúcares fermentativos por excelência no soro, tanto no estado líquido como no concentrado.

A necessidade nutricional das bactérias metanogênicas é satisfeita por praticamente qualquer substrato orgânico e isto porque, ao ser degradado, este compõe-se de carboidratos, lipídeos e proteínas. A maioria destes microrganismos requer somente alguns sais, CO_2 e amônia como fonte de nitrogênio, e sulfeto como fonte de enxofre. A amônia é essencial ao crescimento destes

microrganismos, sendo que nenhuma das espécies conhecidas utiliza-se de aminoácidos ou peptídeos. Além de sulfetos, algumas espécies metabolizam também cisteína (PERES, 1982).

Cabe ressaltar que as bactérias acidogênicas apresentam uma flexibilidade bem maior do que a das bactérias metanogênicas, quanto à utilização de nutrientes (COSTA, 1986). As bactérias metanogênicas necessitam para uma digestão anaeróbica perfeita, em termos de estabilização e produção de gás, basicamente, nitrogênio e fósforo (BRYANT, 1979; HUNGATE, 1982; PERES, 1982) e baixas concentrações de nutrientes como: o cálcio, o magnésio, o potássio, o zinco, o ferro e o cobalto (MEYNELL, 1976b).

Por fim, cabe destacar que alguns aspectos são importantes na produção de gás metano, tanto em escala laboratorial como em escala industrial, que são: o conhecimento das características físico-químicas das bactérias metanogênicas, o tipo de biodigestor empregado e o modo de alimentação deste biodigestor. São necessários, no entanto, estudos mais aprofundados da composição orgânica, volume, disponibilidade e vazão, requerimentos nutricionais e de engenharia e definição dos objetivos que se têm em mente quando se pretende empregar algum método, seja visando a redução de carga poluente ou a geração de energia pelo processo (LEMA et alii, 1981).

3. MATERIAL E METODOS

3.1. Materiais

3.1.1. Substrato

Constitui-se substrato do presente trabalho o soro bruto da fabricação de queijo, oriundo da Cooperativa de Laticínios de Rio Claro Ltda., Município de Rio Claro, Estado de São Paulo. O soro obtido foi colocado em balões plásticos de 20 litros e imediatamente transportado ao laboratório onde, após homogeneização, foram efetuadas coletas de amostras para posteriores análises físico-químicas desse substrato. Na tabela 3, tem-se as características físico-químicas do soro de queijo.

TABELA 3: Características físico-químicas do soro de queijo.

Parâmetros analisados	Resultados obtidos
pH	4,57 +/- 0,13
DQO	68.000 mg DQO/l soro (+/-500)
ST	5.39%
SV	50,91%

O armazenamento desse soro de queijo em laboratório foi realizado em câmara fria, a uma temperatura de 5°C negativos $\pm$ 1°C durante o decorrer do trabalho.

3.1.2. Inóculo

O inóculo se constitui de uma cultura mista de bactérias acidogênicas e metanogênicas (flora mista), composta de esterco bovino fermentado, coletado de um biodigestor em funcionamento, cedido pela BRASMETANO Tecnologias Integradas, Município de Piracicaba, Estado de São Paulo. Esse inóculo foi transportado em recipiente fechado até o local do experimento, onde permaneceu em temperatura ambiente ($\pm$ 25°C) até ser separado em porções equivalentes e diluído a aproximadamente 8% de sólidos totais (ST) para alimentação dos biodigestores. O controle de pH também foi realizado nesse inóculo, antes de ser adicionado soro nos biodigestores. O volume de inóculo adicionado em cada biodigestor foi de 1,6 litros (1600 ml), correspondente a 4/5 de sua capacidade nominal.

3.1.3. Biodigestores

O sistema de digestão anaeróbica foi composto por tubos de PVC e frascos de vidro, interligados

entre si através de um conduto de látex e funcionaram, respectivamente, como biodigestor e gasômetro.

Na figura 4, observa-se o biodigestor construído com o material PVC, cuja espessura de parede é de 2,5 mm e o diâmetro interno de 140 mm, com uma capacidade nominal de 2,0 litros (2000 ml).

Na parte superior frontal e na lateral inferior direita, os biodigestores apresentam aberturas, as quais foram mantidas fechadas com tampas de PVC com rôsca. Estas aberturas tinham a finalidade de permitir, respectivamente, a retirada de amostras para análises e introdução de substrato para alimentação.

Figura 4. Vista dos biodigestores anaeróbicos utilizados no experimento

Neste experimento foram utilizados seis biodigestores, como os descritos anteriormente, e como mostra a figura 5.

Figura 5. Características do biodigestor utilizado no experimento, para a digestão anaeróbica do soro de queijo

Nos biodigestores foi determinada a eficiência do tratamento anaeróbico em relação à remoção do material orgânico no efluente, pela análise de DQO, acompanhada da medição do volume de biogás produzido. A composição do biogás em teores de metano (CH_4), $\text{N}_2 + \text{O}_2$ e

gás carbônico (CO_2) também foi determinada para as três concentrações estudadas (1%, 5% e 10%) e sistemas diários de alimentação.

A geração de biogás e a quantificação do teor de metano nos mesmos foram monitoradas diariamente por via volumétrica e cromatográfica.

Na figura 6, observa-se o gasômetro confeccionado com frascos de vidro de cor escura e com capacidade nominal de 1,5 L (1500 ml), cujo volume foi preenchido com solução salina acidulada (solução Na_2SO_4 e H_2SO_4 , 5%) (STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTE WATER, 1976).

O frasco foi fechado com uma rolha de borracha, atravessada por dois tubos de vidro conectados a condutos de látex, com a finalidade de conduzir o gás até o gasômetro e deslocar a solução para o exterior, respectivamente, à medida que ocorre produção de gás. A solução salina acidulada deslocada foi coletada em frascos Erlenmayer, com capacidade de 2,0 l (200 ml). O volume desta solução coletada corresponde ao volume de gás produzido.

Figura 6. Vista dos gasômetros utilizados no experimento.

3.2. Métodos

3.2.1. Condições gerais do experimento

Neste trabalho foram utilizados seis biodigestores, com o sistema de alimentação diária semicontínuo, utilizando-se, para tanto, o subproduto da produção de queijo, o soro. O pH desse subproduto oscilou entre 4,5 a 4,8 nas alíquotas amostradas.

Os biodigestores, com um volume de inóculo igual a 1,6 litro (1600 ml), foram mantidos em banho-maria à $35^{\circ}\text{C} \pm 0,5$, cuja alimentação diária apresentou

uma carga orgânica média de 5,4 g. DCO/dia. Após cada alimentação, o material em digestão dentro de cada biodigestor foi agitado, manualmente, para que houvesse uma homogeneização do material. Na figura 7 foi esquematizado um dos seis conjuntos, para dar uma idéia global do sistema operacional utilizado no experimento.

A coleta de gás para análise foi realizada no tubo de látex, como mostra a figura 7, individualmente, em cada um dos sistemas operacionais, com o auxílio de uma seringa, através de um tubo com septo de silicone (tubos new vácuo).

A coleta da solução salina acidulada (solução Na_2SO_4 , 25% e H_2SO_4 , 5%), foi realizada em frasco Erlenmeyer, individualmente, em cada um dos sistemas operacionais e foi quantificada com o auxílio de uma proveta graduada.

3.2.2. Condução do experimento

O trabalho, basicamente, constou de duas fases laboratoriais específicas: a aclimação do inóculo e a operação normal dos biodigestores propriamente dita, perfazendo um período total de tempo de 65 dias.

Figura 7: Esquema de um sistema operacional completo utilizado no experimento

3.2.2.1. Aclimação do inóculo

A aclimação do inóculo ao substrato para utilização nas três concentrações estudadas (1%, 5% e 10%), correspondeu a um período de 30 dias. Para tal, os biodigestores foram alimentados, inicialmente, com pequenas alíquotas proporcionais a 1% do seu volume total, cuja carga orgânica foi correspondente a 1,3 g DQO/dia, em relação à carga média prevista de 5,4 g DQO/dia, com um aumento gradual desta, à medida que o pH se tornava estável. Entretanto, para a concentração de 5%, a carga orgânica final foi de 5,4 g DQO/dia e para a concentração de 10% a carga orgânica final foi de 10,3 g DQO/dia.

No período compreendido entre o 30º e o 65º dia da fase experimental é que foram coletados os dados que serviram para a avaliação do processo, apresentados nas tabelas e figuras citadas, uma vez que o período compreendido entre o 1º e o 30º dia do experimento foi utilizado de forma a eliminar as influências do inóculo sobre os tratamentos.

O procedimento adotado nesse experimento foi o de se adicionar cargas únicas de inóculo nos biodigestores (1600 ml), para que houvesse um ganho no tempo de aclimação. Esse método difere do proposto por diversos autores, onde o biodigestor é preenchido parcialmente com inóculo e, na sequência, alimentado de

modo que o volume aumente até atingir o pré-fixado (HEMENS, 1962; LETTINGA et alii, 1980; CRAVEIRO, 1982).

3.2.2.2. Operacionalidade dos biodigestores

A retirada de amostras para análises e para manter o volume constante dos biodigestores foram efetuadas antes de cada alimentação. Procurou-se obedecer a similaridade de horários diários de alimentação, retirada de material para análise e medição de gás gerado.

A operação diária de retirada da alíquota e alimentação foi efetuada, empregando-se uma pipeta de 10 ml. Para a retirada da alíquota, devido à natureza do meio, foi cortada a ponta da pipeta, adaptando-a para uma perfeita coleta. A retirada do material do biodigestor (efluente) antecedeu a alimentação e foi procedida de uma vigorosa agitação dos mesmos, a fim de se obter uma amostragem mais homogênea, proporcionando assim resultados representativos do processo, além do fato de que a agitação ajuda a evitar a perda de gás.

A alimentação do biodigestor foi realizada em três concentrações diferentes, correspondentes a 1%, 5% e 10% do volume total de inóculo adicionado, com intervalos de tempo regulares para os diversos tratamentos. Para a concentração de 1% foi realizada uma única alimentação diária, às 8:00 horas, correspondente a 1,6 litro (1600 ml). Na concentração de 5% foram ministradas alíquotas de substrato

uma única vez durante o dia, às 8:00 horas; alíquotas parceladas em três vezes, às 8:00, 16:00 e 24:00 horas a cada dia e, portanto, intervalos de tempo constantes e ainda alíquotas parceladas de duas em duas horas, perfazendo um total de oito alimentações diárias, das 10:00 às 24:00 horas. Para a concentração de 10% as alíquotas de substrato para a alimentação dos biodigestores foram parceladas em cinco vezes, a intervalos regulares de 03h 36', iniciando-se diariamente às 9:36 horas e terminando às 24:00 horas. Ver Tabela 5.

3.2.3. Parâmetros avaliados

3.2.3.1. pH

As leituras de pH do substrato e efluente foram realizadas diariamente para as três concentrações estudados (1%, 5% e 10%), coletando-se uma amostra de cada biodigestor (Figura 8). Para esse controle foi utilizado o medidor de pH modelo DMPH-2/Digimed calibrado com solução tampão 7,0 e 4,0. Para tanto, leituras de amostras do efluente foram realizadas três vezes ao dia.

3.2.3.2. Volume de gases produzidos

A produção de gás foi monitorada diariamente utilizando-se um gasômetro de deslocamento de líquido, com

uma solução salina acidulada (solução Na_2SO_4 , 25%, e H_2SO_4 , 5%) (STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTE WATER, 1976). O volume de líquido deslocado foi coletado com o auxílio de um Erlemeyer (Figura 7) e medido com proveta graduada, para os diversos tratamentos.

3.2.3.3. Composição dos gases produzidos

A composição desses gases também foi monitorada diariamente, utilizando-se para isso amostras retiradas pelo coletor com uma seringa, através de um tubo com septo de silicone (tubos new vácuo) e, posteriormente, injetadas num cromatógrafo em fase gasosa com coluna N PORAPAK, onde se obteve a separação em $\text{O}_2 + \text{N}_2$, CO_2 e CH_4 , para os diferentes tratamentos. Essa etapa foi realizada em cromatógrafo CG modelo 370, usando detector de chama de hidrogênio e coluna de vidro (50 cm de comprimento por 3,2 mm de diâmetro), contendo PORAPAK-Q de 100 - 120 mesh, junto a CETESB/SP. O gás de arraste foi o N_2 (99,95% de pureza), num fluxo de 40cc/min. e temperaturas de operação iguais a: detector = 150°C , coluna = 50°C e vaporizador = 50°C .

3.2.3.4. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A determinação da DQO do efluente foi realizada segundo o STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF

WATER AND WASTE WATER (1976), o qual permite calcular a DQO do efluente centrifugado para 20 ml de amostra, a partir da seguinte fórmula:

$$\frac{(a - b)c \times 8000}{\text{ml da amostra}} = \text{mg/l de DQO} \quad (1), \quad \text{onde:}$$

a = ml de sulfato ferroso amoniacal* gastos com o branco

b = ml de sulfato ferroso amoniacal* gastos com a amostra

c = normalidade da solução de sulfato ferroso amoniacal*.

* = $\text{Fe} (\text{NH}_4)_2 (\text{SO}_4)_2$.

Esse método requer amostras bastante homogêneas e preconiza a seguinte técnica:

. Colocar 0,4 g de sulfato de mercúrio (HgSO_4) em balão de 500 ml de fundo chato, juntamente com 20 ml da amostra do efluente e 10 ml de solução de bicromato de potássio 0,25N ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$);

. Lentamente, adicionar ao balão 30 ml de solução ácido sulfúrico (H_2SO_4), sulfato de prata (Ag_2SO_4), agitar com cuidado para que haja uma mistura completa dos reagentes;

. Adicionar algumas pérolas de vidro e conectar o balão com o condensador de refluxo;

. Repetir a sequência acima, substituindo os 20ml da amostra do efluente por 20 ml de água destilada para obter a amostra em branco;

. Refluxar a amostra do efluente e o branco por um período de duas horas, e titular a solução de sulfato ferroso amoniacal;

. Para a titulação do $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$, pipetar 10 ml da solução padrão de bicromato de potássio em um Erlenmeyer de 250 ml, adicionar 100 ml de água destilada e 30 ml de ácido sulfúrico concentrado, agitar levemente e deixar esfriar;

. Adicionar 3 gotas do indicador ferroin, e titular com sulfato ferroso amoniacal até a viragem vermelha; anotar os ml gastos para cálculo da normalidade da solução, através da fórmula:
$$C = \frac{10 \times 0.25}{\text{ml gastos}} \quad (2);$$

. Adicionar água destilada até cerca de 140 ml, e titular a amostra e o branco com a solução de sulfato ferroso amoniacal; com esses dados fazer o cálculo da DQO pela fórmula (1).

A DQO é o parâmetro que demonstra o conteúdo de matéria orgânica do resíduo a ser digerido e expressa a eficiência de remoção do material orgânico do efluente.

3.2.4. Determinações complementares

3.2.4.1. Teor de Sólidos Totais (ST %).

O teor percentual de Sólidos Totais (ST %) foi realizado através da retirada de uma alíquota do efluente, para cada um dos tratamentos (concentração 1%, 5% e 10%) e, posteriormente, determinado pela técnica proposta por SILVA (1977). Para o cálculo pesou-se 20 g do material

em cápsula, previamente incinerada em mufla a 550°C e tarada. A cápsula assim preparada foi posta a secar em estufa de ventilação forçada à 105°C, até peso constante. Portanto, a fórmula utilizada para o cálculo foi a seguinte:

$$\text{Sólidos Totais (\%)} = \frac{P_s - P_m}{P_c - P_s} \times 100 \quad (3), \text{ onde}$$

P_m = peso da cápsula de porcelana tarada.

P_c = peso da cápsula de porcelana tarada, mais amostra

P_s = peso seco da amostra

3.2.4.2. Contagem do número de bactérias anaeróbicas (NB)

Esse parâmetro foi medido no Laboratório do Departamento de Zootecnia da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queirós - ESALQ, onde foi feito o crescimento dos microrganismos, em condições de anaerobiose semelhantes às encontradas nos biodigestores, e posteriormente foi realizada uma diluição de 10⁻⁶, de onde foi coletada uma alíquota do material, para contagem do número de bactérias anaeróbicas. Para isso, foram utilizadas amostras compostas, retiradas dos biodigestores, em cada concentração estudada (1%, 5% e 10%), e para cada sistema de alimentação, segundo a técnica de GRRUBB & DEHORITY (1976).

3.2.4.3. Determinação de Açúcares Redutores Totais (ART %)

As amostras compostas foram coletadas para cada um dos biodigestores e concentrações estudadas, perfazendo um total de 90 amostragens, analisadas no Departamento de Química da ESALQ, através de um espectrofotômetro de 535 nm. O método utilizado foi o de Somogyi e Nelson, que baseia-se na redução do Cu^{2+} para Cu^{1+} , e apresenta como fundamento a oxidação do açúcar a ácido orgânico e a complexação do Cu^{1+} pelo reativo de Nelson (arseno-molibdato), produzindo um composto colorido em solução.

3.2.5. Metodologia estatística

A análise da variância foi realizada, considerando o delineamento experimental inteiramente casualizado, para análise estatística dos seguintes fatores: concentração, sistema de alimentação, hora de alimentação e dia. O estudo da regressão foi feita para os parâmetros: número de bactérias, sólidos totais e açúcares redutores totais, além da concentração. Entretanto, os modelos de regressão do 1º e 2º grau, exponencial e logaritmo, foram testados em relação à concentração, e podem ser utilizados para qualquer uma das variáveis como: pH, $\text{O}_2 + \text{N}_2$, CO_2 , Vld e CH_4 . Os tratamentos foram comparados estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade.

4 . RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para que o objetivo deste trabalho fosse alcançado, utilizou-se para a avaliação da digestão anaeróbica os parâmetros pH, teor de sólidos totais, número de bactérias anaeróbicas presentes no efluente e açúcares redutores totais. O experimento desenvolveu-se em escala laboratorial, em biodigestores semicontínuos, mantidos à faixa mesofílica de 35°C

A constatação da presença do metano permite inferir que o funcionamento dos biodigestores foi satisfatório, bem como permite quantificar o teor de metano no biogás, com a finalidade de estabelecer o rendimento do processo e, assim, chegar à análise dos diversos tratamentos.

4.1. Adaptação do inóculo e período de estabilização dos biodigestores

Decorridos 30 dias, nos quais a cultura mista (estêrco bovino) foi deixada para aclimatar-se às condições de temperatura do ensaio e recuperar as condições

de anaerobiose, iniciou-se a alimentação dos biodigestores com cargas de 1,3g, 5,4g e 10,3g DBO de soro de queijo, correspondentes a 1%, 5% e 10% da carga nominal desses biodigestores. Portanto, a digestão anaeróbica foi caracterizada por um estágio inicial de 30 dias, a fim de se conseguir a aclimação do inóculo e cinco tempos de retenção, num período compreendido de 65 dias.

4.1.1. Biodigestores alimentados com soro de queijo sem correção de pH.

Os biodigestores foram tratados com soro de queijo sem correção de pH nas três concentrações estudadas, e mantidos a 35°C, pois segundo SOUZA (1982) é de suma importância operar o biodigestor sem variação significativa de temperatura (Tabela 4).

TABELA 4: Valores de pH amostrados dos diversos volumes de inóculos dos biodigestores, antes da adição de soro, para as diversas concentrações estudadas.

Número de amostragens	Sistemas de alimentação* e concentrações	Leituras de pH nos diversos tratamentos						Valores médios de pH
		1ª Rep.	2ª Rep.	3ª Rep.	4ª Rep.	5ª Rep.	6ª Rep.	
1ª	1% / 1	7,24	7,22	7,21	7,23	7,24	7,24	7,23
2ª	5% / 1	7,38	7,39	7,24	7,33	7,35	7,42	7,35
3ª	5% / 2	7,34	7,31	7,32	7,30	7,31	7,27	7,32
4ª	5% / 3	7,32	7,34	7,34	7,33	7,33	7,34	7,33
5ª	10% / 4	7,37	7,25	7,29	7,31	7,32	7,30	7,31

* Os sistemas de alimentação diária dos biodigestores (1, 2, 3, 4) referem-se, respectivamente, às alimentações realizadas de uma única vez, parcelada em três vezes, parcelada de duas em duas horas e parcelada em cinco vezes.

PERES (1982) relata que abaixo ou acima dos limites de pH 6,0 e 8,0, a taxa de crescimento das bactérias metanoqênicas cai bruscamente, o que veio corroborar com este trabalho, pois à medida que o pH diminuiu nos tratamentos estudados, houve uma menor atividade microbiana causada pelo acúmulo de ácidos do meio sem, entretanto, atingir o nível de paralização. Este fato já era esperado pois, segundo BARKER (1956), uma diminuição do pH pode resultar em uma elevação na concentração de ácidos graxos voláteis e, portanto, na inibição da metanoqênese.

4.2. Parâmetros de acompanhamento e controle do experimento

4.2.1. Parâmetros para Avaliação

4.2.1.1. Variação do pH na digestão anaeróbica do soro de queijo

Pelo que se pode observar nas Tabelas 6, 7, 8, 9 e 10 e Figuras 8 e 9, foram atingidos níveis quase que satisfatórios em todos os tratamentos, tomando-se por base o parâmetro de acompanhamento pH.

Na figura 8 tem-se o histograma que representa os valores de pH para as três leituras diárias realizadas em cada um dos biodigestores, nos cinco tempos de retenção. Verifica-se, nesta figura, que a oscilação do pH durante o período experimental foi menor para o 1º TR e para o 3º TR em relação aos demais, oscilando entre 7,0 a 7,4 para o 1º TR e entre 6,8 a 7,4 para o 3º TR, valores estes bem próximos às faixas ideais de 6,8 a 7,2 (McCARTY & MCKYNNNEY, 1961) e acima do pH crítico de 6,8 (SOUZA, 1982).

Os demais tempos de retenção apresentaram uma variabilidade maior de pH, o que possivelmente tenha influenciado negativamente na atividade microbiana, pois segundo KUBIAK & DUBUIS (1985), o equilíbrio do PH é fundamental para a biodigestão. No 2º TR os biodigestores que apresentaram maior oscilação de pH foram o nº 1, do

Figura 8: Leituras diárias de pH para seis biodigestores mantidos à 35°C, em cinco tempos de retenção

10º ao 13º dia, o nº 2 no 11º dia e o nº 3 do 11º ao 13º dia. No 4º TR a maior oscilação ocorreu no biodigestor nº 2, do 23º ao 27º dia e no 5º TR foi no biodigestor nº 2 no 34º e 35º dias. Entretanto, apesar de estes valores terem se mantido baixos em relação à média do experimento (ver Tabelas 7, 8, 9 e 10), houve produção de biogás, pois o menor pH ocorrido entre os tratamentos foi de 5,4, não muito abaixo do limite de 6,0 preconizado por PERES (1982) para um bom desenvolvimento dos microrganismos. Neste nível de pH ocorre um acúmulo de ácidos no meio, cujo efeito se faz sentir principalmente sobre as bactérias metanogênicas (McCARTY & McKYNNNEY, 1961).

Na figura 9, verifica-se o modelo de regressão logarítmica para pH versus concentração, isto porque foram analisadas três concentrações de substratos, correspondentes a 1%, 5% e 10% do volume nominal dos biodigestores. Entre os modelos de regressão testados, optou-se pelo modelo logarítmico, devido ser este o que melhor expressa o comportamento da variável analisada em relação à concentração, mesmo que o valor de R^2 de 28,5% seja inferior ao valor de R^2 de 32,7% do modelo quadrático ($y = 7,38 - 0,179072x + 0,012954x^2$). O modelo linear com R^2 de 4,6% foi o pior, e os demais modelos como o cúbico e o exponencial não se mostraram satisfatórios.

Cabe salientar que os valores de R^2 apresentados se referem ao cálculo com todos os valores

disponíveis e, por isso, expressa a porcentagem da variação total dos dados que são explicados pelo modelo apresentado. O cálculo a partir dos valores médios apresentaria os mesmos coeficientes da adequação, mas os valores de R^2 seriam muito mais elevados, principalmente para o modelo quadrático, que passa pelas três médias. Ocorre, portanto, que as propriedades matemáticas, neste caso, seriam discutíveis.

Figura 9: Modelo de regressão logarítmico para as variáveis pH (y) e concentração (x), considerando os cinco sistemas de alimentação dos biodigestores

4.2.1.2. Percentual de metano e outros gases no biogás produzido

O volume de biogás produzido durante a fase experimental encontra-se na Tabela 11, expressa em volume (l) de solução salina acidulada, deslocada e coletada diariamente para os diversos tempos de retenção e concentração.

Nas Figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15 são apresentados os gráficos de produção de biogás e o teor de metano no biogás. Nas Tabelas 12, 13 e 14 aparecem os valores da composição do biogás produzido pelos biodigestores, onde tem-se, respectivamente, o volume de metano (CH_4), o volume de nitrogênio e oxigênio ($\text{N}_2 + \text{O}_2$) e o volume de gás carbônico (CO_2), todos expressos em litros e porcentagem.

Analisando as figuras citadas anteriormente, verifica-se que para todos os tratamentos estudados, houve uma tendência de aumentar o teor de metano produzido à medida que aumentou o volume de biogás. Entretanto, este aumento não foi proporcional, possivelmente devido à oscilação do pH, que influi diretamente na atividade das bactérias metanogênicas. Neste caso, ocorre uma maior produção de gás carbônico e de $\text{N}_2 + \text{O}_2$ (Ver Tabelas 13 e 14), em detrimento da produção de metano (Ver Tabela 12). O

Figura 10: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) em litros, e grama de DBO removida em função do tempo (---), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 1.

Figura 11: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) em litros e grama de DBO removida em função do tempo (....), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 2.

Figura 12: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) em litros, e grama de DBO removida em função do tempo (---), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 3.

Figura 13: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) em litros e grama de DBO removida em função do tempo (---), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 4.

Figura 14: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) em litros, e grama de DBO removida em função do tempo (....), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 5.

Figura 15: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) em litros, e grama de DBO removida em função do tempo (···), utilizando três concentrações e cinco sistemas de alimentação, no biodigestor 6.

tratamento mais eficiente foi o 3º TR devido, seguramente, ao sistema de alimentação. O tratamento menos eficiente foi o 4º TR, possivelmente por ser o tratamento em que o contato do material digerido com o ar foi bem maior do que nos demais.

Na Tabela 12 verifica-se que os teores percentuais de metano no biogás varia, em média, entre 15,4% e 38,1%, embora picos de produção de metano acima de 40,0% tenham ocorrido nos diversos tratamentos. Estes valores de metano apresentam-se baixos quando comparados com os obtidos no tratamento de água residual de indústrias de amido de milho (HEMENS, 1962), ou mesmo pela utilização de resíduos de indústria de farinha de mandioca (MOTTA, 1985). Segundo CHANDLER et alii (1980) e CRAVEIRO (1982) estes resultados são esperados em experimentos que contenham menores teores de materiais facilmente biodegradáveis (carboidratos, lipídeos e proteínas).

A figura 16 apresenta o modelo de regressão quadrática para as variáveis volume de biogás produzido pelos biodigestores versus concentração. Como já discutido anteriormente, foram testados vários modelos de regressão, sendo escolhido o que melhor descreve o comportamento da variável analisada, independentemente do valor de R^2 obtido. Neste caso a regressão quadrática apresentou um R^2 de 33,8% para um R^2 38,0% da equação logarítmica [$y = (183,233660) \times 9738132$], e isso mostra que os modelos

ajustam uma porção significativa de variação para as outras variáveis. A regressão quadrática apresentou um efeito de máximo na concentração de 8%.

4.2.1.3. Carga orgânica adicionada e eficiência da digestão anaeróbica do soro de queijo em relação à remoção de DQO

Na tabela 15 encontram-se os valores em grama e percentuais de remoção de DQO obtidos na digestão anaeróbica do soro de queijo, utilizando-se diferentes cargas orgânicas diárias nos biodigestores, em escala laboratorial.

Nas figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15, visualiza-se o comportamento dos tratamentos em relação à remoção de DQO nos cinco tempos de retenção para cada biodigestor.

A eficiência da biodegradação do material orgânico do soro de queijo foi caracterizado pela análise de DQO no efluente centrifugado. A variação bastante alta nos resultados obtidos e a discordância em relação a outros autores é de se esperar, devido à grande variabilidade existente nas características dos resíduos industriais, principalmente quanto à relação entre nutrientes como carbono, nitrogênio e potássio. CRAVEIRO (1982) cita que resíduos utilizados com relação C/N e C/P, fora dos

Figura 16: Modelo de regressão quadrática para as variáveis volume de biogás produzido (y) e concentração (x) considerando os cinco sistemas de alimentação dos biodigestores.

limites, necessita de suplementação nutricional do elemento faltante. Segundo o mesmo autor, outro fator importante é o teor elevado de sólidos grosseiros nos resíduos, o que torna difícil uma determinação precisa da DQO em ensaios de digestão anaeróbica.

GRYSCHKE & BELO (1983) citam que o rendimento da digestão anaeróbica é grandemente afetada pela composição química dos resíduos, nos quais os fibrosos são de baixa digestibilidade e apresentam potenciais mais reduzidos quando comparados aos resíduos de alta digestibilidade. A este respeito, VAN VELSEN & LETTINGA (1980) e GONÇALVES (1982), alertam para o fator digestibilidade, uma vez que os principais componentes prontamente digeríveis na matéria orgânica poderão não estar disponíveis aos microrganismos, por apresentarem-se sob formas estruturais com ligações químicas estáveis.

A literatura mostra a eficiência da digestão anaeróbica no processo de remoção de DQO em materiais que apresentam altos teores de matéria orgânica e alta digestibilidade e, fundamentalmente, de resíduos industriais de laticínios, como é o caso do soro de queijo. Segundo SOUZA (1982), a eficiência do processo de remoção de DQO está intimamente ligada ao tipo de resíduo e ao tipo de biodigestor utilizados. Entretanto, maiores níveis na eficiência de remoção de DQO poderão ser atingidos com o auxílio de um sistema de agitação (HARISCHANDRA & SAVENA, 1969), um sistema de aquecimento em conjunto com o sistema

de agitação (SCHROEDER, 1977) e de floculantes químicos, com a finalidade de elevar a quantidade de biomassa (BARFORD et alli, 1986). Este autor, usando floculante químico, alcançou uma eficiência de 99% na remoção de DQO no soro de queijo, em escala laboratorial. Neste experimento também ocorreu flutuações nos valores de remoção de DQO que situam-se, em média, entre 28,7% e 60,7%, justificando, em parte, as baixas conversões do substrato a gás e a baixa degradação da matéria orgânica nos tratamentos.

Pela análise das figuras 10 a 15, pode-se notar nitidamente a maior estabilidade em torno da média e maior eficiência do 3º TR. Contudo, verifica-se na Tabela 15 que os valores percentuais do 2º TR e 4º TR em geral também foram satisfatórios. Em termos percentuais de remoção de DQO, o 1º TR e o 5º TR foram bastante semelhantes, ficando como o pior tratamento o 5º TR, com um percentual global médio de 39,7%. Verifica-se, entretanto, que os tratamentos, de forma geral, responderam satisfatoriamente, devido ao fato de se tentar reproduzir, em laboratório, uma condição real encontrada na prática, evitando-se técnicas que inviabilizassem o uso de biodigestores pelas indústrias de laticínios, pela elevação dos custos.

4.2.2. Parâmetros adicionais

4.2.2.1. Número de bactérias anaeróbicas contidas no efluente pelo Teor de Sólidos Totais e Açúcares Redutores Totais

As características físicas da matéria orgânica como por exemplo os teores de sólidos, têm marcante influência na escolha e na adoção de um sistema operacional anaeróbico, uma vez que não só o bom desenvolvimento do processo como as características desses biodigestores e custos são influenciados por sua concentração (BARBOSA, 1982; CRAVEIRO, 1982c).

Neste experimento, as amostras coletadas no efluente dos biodigestores são apresentadas na Tabela 16, onde se observa que, para todos os tratamentos estudados, os valores percentuais oscilaram entre 2,34% e 5,18% e, portanto, abaixo dos preconizados por BARBOSA (1982). Este mesmo autor alerta que efluentes com elevados teores de sólidos totais em suspensão necessitam sofrer diluições, de modo a obter-se concentrações de sólidos ao redor de 6 a 10%, devido ao fato de que todos os sistemas operacionais são dimensionados para operarem com concentrações máximas nesta ordem. Em casos em que for necessário fazer a diluição, CRAVEIRO (1982b) propõe a utilização de outro efluente orgânico conjuntamente com a água, cuja finalidade seria de fazer uma complementação nutricional.

Em relação à Tabela 17, pode-se observar que o número de bactérias anaeróbicas esteve dentro de uma faixa aceitável para todos os tratamentos, apesar de apresentar uma flutuação de 20 a 51 bactérias por amostragem, o que em nada influenciou negativamente, a produção de metano. Esta afirmativa pode ser confirmada, à medida que foi o 3º TR onde se obteve o maior percentual na produção de metano e o que apresenta, em média, o menor número de bactérias por amostragem. Na tabela 18, verifica-se o teor de açúcares redutores totais em porcentagem de amostras dos efluentes dos biodigestores, para cada concentração e sistemas de alimentação. Este elemento faz parte da matéria orgânica biodegradável, e serve como nutriente para as bactérias, pois é um componente prontamente digerível em ambientes anaeróbicos, como comprovado pelos valores aqui relatados.

O estudo de regressão foi realizado entre as variáveis teor de sólidos totais e açúcares redutores totais pelo número de bactérias anaeróbicas do efluente. No primeiro caso o modelo que melhor ajustou às variáveis foi o linear, com um R^2 de 38,6% (Figura 17), e para os açúcares redutores não houve significância. Entretanto, para melhor estudar estas interrelações, estabeleceu-se o coeficiente de determinação parcial, que mostrou existir uma associação entre as variáveis sólidos totais e açúcares

Figura 17: Modelo de regressão linear para as variáveis número de bactérias anaeróbicas (y) e sólidos totais (x), considerando três concentrações e cinco sistemas de alimentação dos biodigestores.

reduzidores. Contudo, o que explica realmente o número de bactérias é o teor de sólidos totais e não o teor de açúcares reduzidores totais.

4.3. Considerações Gerais

O delineamento experimental adotado para análise dos parâmetros desse experimento foi o inteiramente casualizado, usando-se cada sistema de alimentação como tratamento e os biodigestores como repetição. Os tratamentos foram comparados estatisticamente pelo teste de Duncan ($p \geq 0,05$), considerando-se uma análise individual para cada fator (Tabela 19). Verificou-se que, quanto ao pH, o tratamento de três alimentações diárias foi o melhor, seguido pelos tratamentos de cinco e de uma alimentação diária, que não diferiram entre si. O pior tratamento foi o de oito alimentações diárias.

No que se refere ao volume de solução salina acidulada produzida, o melhor tratamento foi novamente o de três alimentações diárias, seguido pelos tratamentos de cinco e de oito alimentações diárias, que não diferiram entre si, sendo o pior tratamento, neste caso, o de uma alimentação diária. Já para os demais parâmetros como produção de metano, teor de CO_2 e N_2 e teor de gás

carbônico, não houve diferença significativa entre os tratamentos.

5. CONCLUSÕES

Para as condições em que foi conduzido este experimento, pode-se concluir que:

- 1) Foi possível tratar os resíduos de indústrias de laticínios, como o soro do queijo, por digestão anaeróbica, com produção de biogás.
- 2) As condições de anaerobiose do presente trabalho foram afetadas pelos sistemas de alimentação dos biodigestores.
- 3) O melhor sistema de alimentação em relação ao volume de biogás produzido foi o de três alimentações diárias e o pior foi o de alimentação diária única.
- 4) Não foram constatadas, estatisticamente, diferenças significativas entre os sistemas de alimentação para a produção de metano, mas houve uma tendência para que o sistema de três alimentações diárias fosse o melhor e para que o sistema de oito alimentações diárias, o

pior.

- 5) A diminuição da digestão anaeróbica no sistema de oito alimentações diárias deve-se possivelmente à maior entrada de oxigênio nos biodigestores.
- 6) Pelo modelo de regressão quadrático, o ponto de máximo para concentração de substrato foi 8%.
- 7) Comparando-se a remoção da DQO em relação ao pH, verifica-se que houve uma maior eficiência para o sistema de três alimentações diárias na concentração de 5%.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFA-LAVAL. Proteínas de soro removidas com sucesso na fabricação de queijos. Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes, Juiz de Fora, 148: 13 - 6, Jan/Fev, 1970.

ARAIN, E. Tratamento de efluentes de fecularias em reator - anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 12., Balneário de Camboriú, 1983. Anais. Balneário de Camboriú, Fundação de Amparo à Tecnologia e ao Meio Ambiente, p. 1 a 21, 1983.

ARAÚJO, E.H.; MELO, G.S.; OLIVEIRA, I. Operação de biodigestor anaeróbico em escala de bancada para produção de biogás a partir de soro de queijo. Revista de Microbiologia, São Paulo, 17 (2): 155 - 61, 1986.

ASSOCIATION POUR LA PROMOTION INDUSTRIE AGRICULTURE. Les lactoserums: traitements et utilisations. Paris, 261 p., 1973.

BARBOSA, R.A. Geração de metano através da biodigestão anaeróbica de vinhoto de caldo de cana-de-açúcar em reator de fluxo ascendente. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE TECNOLOGIA DO TRATAMENTO DO VINHOTO, 2, Maceió, 1982. Anais. Rio de Janeiro, IBRASA, p. 1 - 17, 1982.

BARFORD, J.P.; CAIL, R.G.; CALLENDER, I.J.; FLOYD, E.J. Anaerobic digestion of high-strength cheese whey utilizing semicontinuous digesters and chemical flocculant addition. Biotechnology and Bioengineering, New York, 28: 1601 - 7, 1986.

BARKER, H.A. Biological formation of methane. Industrial and Engineering Chemistry, Washington, 48 (9): 1438 - 42, 1956.

BATISTA, L.F. Construção e operação de biodigestor modelo indiano. Energia: fontes alternativas, São Paulo, 3 (15): 38 - 56, 1981.

BOENING, P.H. & LARGEN, V.F. Anaerobic fluidized bed whey treatment. Biotechnology and Bioengineering, New York, 24 (11): 2539 - 56, 1982.

BRYANT, M.P. Rumen Methanogenic Bacteria. Physiology of digestion in the ruminant. Butterworth. London p. 411 - 8, 1965.

BRYANT, M.P. Microbial methane production. Theoretical aspects. Journal of Animal Science, New York, 48 (1): 193 - 201, 1979.

BUSWELL, A.M. & SOLLO, F.W. The mechanism of methane fermentation. Industrial and Engineering Chemistry, Washington, 70: 1178 - 80, 1948.

BUSWELL, A.M. & MUELLER, H.F. The mechanism of methane fermentation. Industrial and Engineering Chemistry, Washington, 44 (3): 550 - 2, 1952.

CALLANDER, I.J. & BARFORD, J.P. Cheese whey anaerobic digestion; effect of chemical flocculant addition. Biotechnology Letters, Kent., 5 (3): 153 - 8, 1983.

CALZADA, J.F.; DE LEÓN, O.R.; ARRIOLA, M.C.; DE MICHEO, F.; ROLZ, C.; DE LEÓN, R.; MENCHU, J.F. Biogas from coffee-pulp. Biotechnology Letters, Kent., 3 (12), 713 - 6, 1981.

CEREDA, M.P.; FLORS, A.; VALLES, S.; ALBEROA, J. Tratamiento anaerobio en dos fases de suspensiones amiláceas. I. Fase acidogénica. Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, Madrid, 26 (1) : 101 - 8, 1986.

CHANDLER, J.A.; JEWELL, W.J.; GOSSET, J.M.; VAN SOEST, P.J.; ROBERTSON, J.B. Predicting methane fermentation biodegradability. Biotechnology and Bioengineering, New York, 10: 93 - 107, 1980.

COLLERAN, E.; BARRY, M.; WILKIE, A.; NEWELL, P.J. Anaerobic digestion of agricultural wastes using up flow anaerobic - filter design. Process Biochemistry, Rickmans Worth, p. 12 - 7, Mar./Apr., 1982.

COMPANHIA AUXILIAR DE EMPRESAS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. Departamento de Estudos de Novas Fontes Alternativas de Energia. O biogás e sua tecnologia. Rio de Janeiro, 35p, 1981.

COSTA, S.R.A. & LACAVA, P.M. Observações preliminares da digestão anaeróbica do soro de queijo. In: SEMINÁRIO REGIONAL DE ECOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, S. São Carlos, 1986. Anais. São Carlos, UFSCar, 1986.

CRAVEIRO, A.M. Digestão anaeróbia; alguns trabalhos do IPT.

In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 2., Rio de Janeiro, 1981. Anais. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, p. 380 - 91, 1981.

CRAVEIRO, A.M. Influência da proporção de lixo e lodo de esgoto no processo de digestão anaeróbica desses resíduos. São Paulo, 136 p., 1982a. (Mestrado, Escola Politécnica/USP).

CRAVEIRO, A.M. Considerações sobre projetos de plantas de biodigestão. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE A PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS, 1., São Paulo, 1982. Apostila. São Paulo, Sociedade Brasileira de Microbiologia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 39 p., 1982b.

DE LA TORRE, I. & GOMA, G. Characterization of anaerobic microbial culture with high acidogenic activity. Biotechnology and Bioengineering, New York. 23: 185 - 99, 1981.

DITCHFIELD, P. Industrial wastewater treatment; the anaerobic alternative. Trends Biotechnology, Amsterdam, p. 309 - 13, Dec., 1981.

FERRAT, A. Como valorizar o subproduto das fábricas de queijo, o "Lacto-Soro". Boletim do Leite, Rio de Janeiro, 618: 32 - 8, 1980.

FOLLMANN, H. von & MARKL, H. pH - Statisches Verfahren zur Kontinuerlichen Anaeroben Vergarung von Hochbelasteten Abwassern zu Methan 2. Eperimentelle Untersuchungen und Verifizierung des Konzeptes am Beispiel der Molke. Milchwissen Schaft, Hermann, 34 (7): 393 - 6, 1979.

GALLO, C.R. Estudo da microflora de derivados do leite como índice de qualidade. Piracicaba, 93 p., 1978. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

GARCIA BILBAO, J.L. Aprovechamiento del suero de leche desproteinizado y de materiales nitrogenados de desecho por algunas levaduras. Alimentaria, 18: 65 - 9, ene./feb., 1981.

GIERUSZCZAK, T.E. Biomass; energy source of the future? Engineering Digest, Toronto, 21 (1): 25 - 30, Jan. 1975.

GONÇALVES, A.C.R. A potencialidade de outros substratos para a digestão anaeróbica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE FERMENTAÇÃO, 5., Viçosa, 1982. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, p. 1 - 29, 1982.

GRRUBB, J.A. & DEHORITY, B.A. Variation in colony counts of total viable anaerobic rumen bacteria as influenced by media and cultural methods. Applied and Environmental Microbiology, Baltimore, 31: 262-7, 1976.

GRYSCHKEK, J.M. & BELO, F.R. Produção e uso do gás metano na agricultura e agro-indústria. Piracicaba, ESALQ, 15 p., 1983.

HARISCHANDRA, H.C. & SAVENA, K.L. Anaerobic digestion of cheese whey utilizing sistem of agitation in digester. Environmental Health, London, 11 (1): 41-50, 1969.

HEMES, J.; MEIRING, P.G.J.; STANDER, G.J. Full-scale anaerobic digestion of effluents from the production of maize-starch. Water and Wastewater treatment, p. 16 - 8, May/June, 1962.

HICKEY, R.F. & OWENS, R.W. Third Symposium Biotechnology in Energy Production and Conservation, Gatlinburg, Tennessee, 1981.

HILLS, D.J. Methane Gas Production from Dairy Manure at High Solids Concentration. American Society of Agricultural Engineers, p. 122 - 6, 1980.

HUNGATE, R.E. "The rumen and its microbes". New York, Academic Press, p. 26 - 30, 1966.

HUNGATE, R.E. The microbiology of bio-digestion. In: SIMPÓSIO LATINO - AMERICANO SOBRE PRODUÇÃO DE BIOGÁS, 1., São Paulo, 1982. São Paulo, Sociedade Brasileira de Microbiologia / Comitê Latino - Americano de Microbiologia Ambiental, 1982. 91p.

HUSER, B.A.; WUHRMAN, K.; ZEHNDER, A.J.B. Methanothrix soehngenii gen. nov., sp. nov., a new acetotrophic non-hydrogen-oxidizing methane bacterium. Archives of Microbiology, New York, 139: 1 - 9, 1982.

KAMM, R.; MEACHAM, K.; HARROW, L.S.; MONROE, F. Evaluating new business opportunities from food wastes. Food Technology, Chicago, 36: 36 - 40, 1977.

KANTEREWICZ, R. J. de; CHIRIFE, J.; LAGARDE, E.A. de. Preservation of concentrated cheese whey by combined factors. Journal of Food Science, Chicago, 50: 1629 - 32, 1985.

KEENAN, J.D. & LA GRECA, M.D. Control of anaerobic digester operation. In: ANNUAL CONFERENCE OF WATER POLLUTION CONTROL ASSOCIATION OF PENNSYLVANIA, 48., Pennsylvania, Water Pollution Control Association, p. 1 - 28, 1976.

KIENER, A. & LEISINGER, T. Plating efficiency of methanogenic bacteria. Experientia, Basel, 38: 1379, 1982.

KUBIAK, C. & DURUIS, T. Valorização dos dejetos e dos efluentes agrícolas, industriais e domésticos. In: SCRIBAN, R. Biotecnologia. São Paulo, Manole, p. 400 - 26, 1985.

LEMA, J.M.; CASAS, C.; PARIS, J.M. Elección de tecnología en el tratamiento de aguas residuales por digestión anaeróbica. In: CONGRESO SOBRE TECNOLOGIAS DE BASSO COSTO PARA LA DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES, 1., Madrid, 1981. Resumos. Madrid, Universidade Autônoma de Barcelona, 14 p., 1981.

LETTINGA, G. & VAN VELSEN, A.F.M.; HOBMA, S.W.; DE ZEEUW, W.; KLAPWICK, A. Use of up-flow sludge blanket (USB) reactor concept for biological waste water treatment concept for biological waste treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering, New York, 22: 699 - 734, 1980.

LETTINGA, G. & VINKEN, J.N. Feasibility of up-flow anaerobic sludge blanked (VASB) process for the treatment of low-strength wastes. In: EUROPEAN SEWAGE AND REFUSE SYMPOSIUM, 4., Munich, p. 625 - 34, 1978.

LO, K.V. & LIAO, P.H. Digestion of cheese whey with anaerobic rotating biological contact reactors. Biomass, Essex, 10: 243 - 52, 1986.

MCCARTY, P.L. & MCKINNEY, R.E. Volatile acid toxicity in anaerobic digestion. This Journal, Washington, 33 (3): 223 - 32, 1961.

MCCARTY, P.L. Anaerobic waste treatment fundamentals - part one: chemistry and microbiology. Public Works, p. 107 - 12, Sept. 1964.

McINERNEY, M.J. & BRYANT, M.P. Metabolics stage and energetics of microbial anaerobic digestion. In: STAFFORD, D.A.; WHERTLEY, B.I.; HUGHES, D.E. Anaerobic Digestion. London, Applied Science Publishers, p. 91 -8, 1980.

MEYNELL, P.J. Introducing methane. In: _____. Methane, planning a digester. New York, Schoken Bookes, p. 1 - 5, 1976a.

MEYNELL, P.J. Understanding the process and its requirements. In: _____. Methane, planning a digester. New York, Schoken Books, p. 6 - 19, 1976b.

MEYNELL, P.J. Benefits of anaerobic digestion. In: _____. Methane, planning a digester. New York, Schoken Books, p. 21 - 33, 1976c.

MOSEY, F.E. Anaerobic biological treatment of food industry wastewater. *Water Pollution Control*, Kent., p. 273 - 91, 1981.

MOTTA, L.C. Utilização de resíduos de indústrias de farinha de mandioca em digestão anaeróbica. Botucatu, 112 p., 1985. (Mestrado - Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu / UNESP).

NAAS, I. A. Methane production from livestock residues. Ecosistema, Revista da Faculdade de Agronomia e Zootecnia "Manoel Carlos Gonçalves", Espírito Santo do Pinhal, São Paulo, 4 (1): 129 - 38, 1979.

NOGUEIRA, L.A.H. Biodigestão e a alternativa energética. São Paulo, Nobel, 93 p., 1986.

PAYNTER, M.J.B. & HUNGATE, R.E. Characterisation of *Methanobacterium mobilis* sp. n., isolated from the rumen. Journal of Bacteriology, Washington, 95: 1943 - 51, 1968.

PERES, C.S. Microbiologia da digestão anaeróbica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE FERMENTAÇÃO, 5., Viosa, 1982. São Paulo, Sociedade Brasileira de Microbiologia, p. 1 - 40, 1982.

- POHLAND, F.E. Anaerobic stabilization. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE A PRODUÇÃO DE BIOGÁS, 1, São Paulo, 1982. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas p. 1 - 92, 1982.
- ROLZ, C.; MENCHU, J.F.; CALZADA, F.; DE LEÓN, R.; GARCIA, R. Biotechnology in washed coffee processing. Process Biochemistry, RickmasWorth, p. 8 - 11, Mar./Apr., 1982.
- SALLES FILHO, S.L.M. Um novo conceito operacional na biogênese do metano. Botucatu, 85 p., 1985. (Mestrado - Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu/UNESP).
- SAMPAIO, A.M. Utilização de resíduos sólidos desidratados de efluente de biodigestor oriundos de esterco de galinhas matrizes e vacas em lactação na alimentação de frangos de corte. Piracicaba, 79 p., 1984. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz")
- SCHROEDER, E.D. Anaerobic process. In: _____. Water and Wastewater treatment. New York, McGraw-Hill, p. 313 - 37, 1977.
- SCOTT, R.I.; WILLIAMS, T.N.; LLOYD, D. Oxygen sensitivity of methanogenesis in rumen and anaerobic digester populations using mass spectrometry. Biotechnology Letters, Kew, 5: 375 - 80, 1983.

SILVA, M.O.S.A. Análises físico-químicas para controle das estações de tratamento de esgotos. São Paulo, Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental, 226 p., 1977.

SILVA, C.A.M.; TIBANA, A.; NAYLON, M.B. Estudo microbiológico do queijo tipo Minas Frescal, consumido na cidade do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA, 10., Rio de Janeiro, 1979. Resumos. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileiro de Microbiologia, p. 52, 1979.

SOUZA, M.E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbica. São Paulo, CETESB, 30 p., 1982. (Mimeografado)

SUTTON, P.M. & LI, A. Proceedings of 36th. Industrial Waste Conference, Purdue University, 1981.

TOERIE, D.F. & SIEBERT, M.L. A method for the enumeration and cultivation of anaerobic "acid-forming" bacteria present in digesting sludge. Water Research, Elmsford, 1 : 397 - 404, 1967.

URSINOS, J.A.F.R. de; GAMERO, R.N.; CABELLO, R.L.; BUENDIA, A.S.G.; JAUREGUI, G.N.M.S. Depuración anaerobia del azeite como fuente de energía. Grasas y Aceites, Seville, 33 (5): 265 - 70, 1982.

VAN den BERG, L. Methane from wastes. In: ROYAL CANADIAN - INSTITUTE, Ottawa, National Research Council of Canada, (18541): p. 1 - 45, 1980.

- VAN VELSEN, A.F.M. Adaptation of methanogenic sludge to high ammonia nitrogen concentrations. Water Research, Elmsford, 13: p. 995 - 9, 1979.
- VAN VELSEN, A.F.M. & LETTINGA, G. Effects of feed composition on digester performance. In: STAFFORD, D.A., WHEATLEY, B.I.; HUGHES, D.E. Anaerobic digestion. London, Applied Science Publishers, p. 113 - 30, 1980.
- VAREL, V.H.; HASHIMOTO, A.G.; CHEN, Y.R. Effect of Temperature and retention Time on Methane Production from Beef Cattle Waste. Applied and Environmental Microbiology, Baltimore, 2 (40): p. 217 - 22, 1980.
- VIEIRA, S.M.M. & SOUZA, M.E. Métodos analíticos para o acompanhamento da biodigestão. São Paulo, CETESB, 11 p., 1981. (Mimeografado).
- VIEIRA, M.A.; BRANDÃO, S.C.C.; PINHEIRO, A.J.R.; GUIMARÃES, W.R. Conservação do soro de queijo minas com peróxido de hidrogênio. Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes, Juiz de Fora, 40 (240): p. 17 - 28, 1985.

VILLEN, R.A.; CRAVEIRO, A.M.; ROCHA, C.M.; NETTO, W.S.

TRATAMENTO DE VINHOTO POR DIGESTÃO ANAERÓBICA - SISTEMA DE FLUXO ASCENDENTE. Energia: fontes alternativas, São Paulo, 2 (15): p. 22 - 4, 1981.

WILLIAMS, R.T. & CRAWFORD, R.L. Methane production in Minnesota peatlands. Applied and Environmental Microbiology, Baltimore, 6 (47): p. 1266 - 71, 1984.

YOSHIDA, M. & HOSHII, Nutritive value of Residue of Methane Fermentation From Excreta of Domestic Animals and Poultry. Nutrition Abstracts and Reviews, Farnham Royal, 49 (1): 10p, 1979.

ZEHNDER, A.J.B. & WEHRMANN, K. Physiology of methanobacterium strain Az. Archives of Microbiology, New York, 111: p. 199 - 205, 1977.

ZEIKUS, J.G. Microbial ecophysiology of whey biomethanation: Intermediary metabolism of Lactose degradation in continuous culture. Applied and Environmental Microbiology, Baltimore, 51 (1): p. 180 - 7, 1986.

APENDICE

TABELA 5: Sistemas de alimentação diária dos biodigestores, nos diversos tratamentos estudados, e as respectivas cargas orgânicas adicionadas

Quantidade de soro adicionado ao biodigestor/volume do bio-digestor	Sistemas de alimentação diária dos biodigestores	Parcelamento do volume de soro adicionado nas três concentrações					Intervalo de tempo para adição do soro (h)
		Tempo de Retenção em dias					
		1º	2º	3º	4º	5º	
		(1º - 5º dia) (9º - 13º dia) (16º - 20º dia) (23º - 27º dia) (31º - 35º dia)					
Concentração 1%	única	16 ml/ alimentação	-	-	-	-	24
Concentração 5%	única	-	80 ml/ alimentação	-	-	-	24
Concentração 5%	3 vezes	-	-	30:20:30 ml/ alimentação	-	-	8
Concentração 5%	8 vezes	-	-	-	10 ml/ alimentação	-	2
Concentração 10%	5 vezes	-	-	-	-	30:30:30:40 ml/ alimentação	3,6

TABELA 6: Valores de pH dos biodigestores mantidos à 35°C, para uma única alimentação diária, na concentração de 1%.

Dias	Número de ordens da leitura	Valores de pH					
		Biod. 1	Biod. 2	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 5	Biod. 6
1º	1ª	7,39	7,36	7,41	7,33	7,36	7,37
	2ª	7,19	7,15	7,23	7,24	7,26	7,09
	3ª	7,21	7,18	7,23	7,23	7,29	7,16
-	média	7,26	7,23	7,29	7,27	7,30	7,21
2º	1ª	7,34	7,31	7,34	7,33	7,37	7,44
	2ª	7,19	7,15	7,17	7,18	7,21	7,13
	3ª	7,20	7,16	7,20	7,21	7,23	7,17
-	média	7,24	7,21	7,24	7,24	7,27	7,25
3º	1ª	7,29	7,29	7,27	7,26	7,33	7,29
	2ª	7,14	7,12	7,11	7,11	7,18	7,15
	3ª	7,16	7,18	7,15	7,16	7,22	7,15
-	média	7,20	7,20	7,18	7,18	7,24	7,20
4º	1ª	7,28	7,30	7,29	7,29	7,31	7,29
	2ª	7,11	7,10	7,07	7,12	7,13	7,08
	3ª	7,16	7,14	7,21	7,20	7,21	7,13
-	média	7,18	7,18	7,19	7,20	7,22	7,17
5º	1ª	7,28	7,29	7,29	7,30	7,31	7,27
	2ª	7,10	7,13	7,12	7,13	7,18	7,15
	3ª	7,16	7,17	7,17	7,26	7,22	7,18
-	média	7,18	7,20	7,19	7,23	7,24	7,20

TABELA 7: Valores de pH dos biodigestores mantidos à 35°C, para única alimentação diária, na concentração de 5%.

Dias	Número de ordens da leitura	Valores de pH					
		Biod. 1	Biod. 2	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 5	Biod. 6
9º	1ª	7,32	7,30	7,26	7,26	7,29	7,27
	2ª	6,03	6,64	6,70	6,67	6,79	6,76
	3ª	6,30	6,80	6,75	6,77	7,05	6,84
-	média	6,55	6,91	6,90	6,90	7,04	6,96
10º	1ª	6,65	7,05	7,01	7,07	7,25	7,13
	2ª	5,76	6,40	6,24	6,35	6,61	6,56
	3ª	5,95	6,46	6,36	6,44	6,69	6,59
-	média	6,12	6,64	6,54	6,62	6,85	6,76
11º	1ª	5,94	6,64	6,61	6,85	7,00	6,88
	2ª	5,74	5,54	5,57	5,81	6,30	6,09
	3ª	5,49	5,61	5,76	6,04	6,44	6,20
-	média	5,72	5,93	5,98	6,23	6,58	6,39
12º	1ª	5,51	5,89	5,80	6,30	6,72	6,46
	2ª	5,84	6,25	6,19	6,64	6,94	6,77
	3ª	5,84	6,34	6,26	6,82	7,14	6,95
-	média	5,73	6,16	6,08	6,59	6,93	6,73
13º	1ª	5,63	6,21	6,13	6,35	6,20	6,56
	2ª	5,91	5,87	6,15	6,28	6,82	6,73
	3ª	5,92	6,25	6,41	6,72	7,15	6,98
-	média	5,82	6,11	6,23	6,45	6,72	6,76

TABELA 8: Valores de pH dos biodigestores mantidos à 35°C, para três alimentações diárias na concentração de 5%.

Dias	Número de ordem da leitura	Valores de pH					
		Biod. 1	Biod. 2	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 5	Biod. 6
16º	1ª	7,24	7,28	7,23	7,24	7,20	7,23
	2ª	7,11	7,29	7,37	7,24	7,28	7,25
	3ª	7,13	7,22	7,25	7,31	7,22	7,20
-	média	7,16	7,26	7,28	7,26	7,23	7,23
17º	1ª	7,24	7,29	7,35	7,29	7,23	7,25
	2ª	7,21	7,24	7,20	7,21	7,19	6,85
	3ª	7,19	7,19	7,24	7,26	7,23	7,20
-	média	7,21	7,24	7,26	7,25	7,22	7,10
18º	1ª	7,15	7,21	7,23	7,25	7,26	7,24
	2ª	7,16	7,20	7,21	7,26	7,20	7,25
	3ª	7,13	7,19	7,19	7,26	7,23	7,20
-	média	7,15	7,20	7,21	7,26	7,23	7,23
19º	1ª	7,20	7,20	7,30	7,30	7,23	7,23
	2ª	7,24	7,25	7,36	7,35	7,38	7,33
	3ª	7,21	7,14	7,23	7,25	7,18	7,25
-	média	7,22	7,20	7,30	7,30	7,26	7,27
20º	1ª	7,26	7,03	7,21	7,24	7,28	7,24
	2ª	7,27	7,03	7,26	7,26	7,26	7,22
	3ª	7,20	7,02	7,24	7,20	7,22	7,23
-	média	7,24	7,03	7,24	7,23	7,25	7,23

TABELA 9: Valores de pH dos biodigestores mantidos à 35°C, para oito alimentações diárias na concentração de 5%.

Dias	Número de ordem da leitura	Valores de pH					
		Biod. 1	Biod. 2	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 5	Biod. 6
23º	1ª	7,16	6,04	7,24	7,30	7,23	7,29
	2ª	6,97	5,96	6,93	7,87	6,90	6,99
	3ª	7,00	5,98	6,93	6,61	6,94	6,93
-	média	7,04	5,99	7,03	7,26	7,02	7,07
24º	1ª	7,12	5,97	7,01	7,14	6,99	7,16
	2ª	6,94	6,81	6,84	6,94	6,72	6,89
	3ª	6,99	5,67	6,82	6,84	6,69	6,86
-	média	7,02	5,82	6,89	6,97	6,80	6,97
25º	1ª	7,22	5,70	7,00	7,03	6,85	7,08
	2ª	6,99	5,66	6,69	6,91	6,54	6,89
	3ª	6,93	5,57	6,63	6,72	6,61	6,76
-	média	7,05	5,64	6,77	6,89	6,67	6,91
26º	1ª	7,17	5,62	6,83	7,01	6,67	7,03
	2ª	6,91	5,42	6,61	6,78	6,43	6,77
	3ª	6,88	5,42	6,61	6,66	6,40	6,69
-	média	6,99	5,49	6,68	6,82	6,50	6,83
27º	1ª	7,14	5,41	6,70	6,37	6,57	6,91
	2ª	7,00	5,47	6,51	6,72	6,44	6,77
	3ª	6,92	5,39	6,54	6,48	6,27	6,72
-	média	7,02	5,42	6,58	6,52	6,43	6,80

TABELA 10: Valores de pH dos biodigestores mantidos à 35°C, para cinco alimentações diárias na concentração de 10%.

Dias	Número de ordem da leitura	Valores de pH					
		Biod. 1	Biod. 2	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 5	Biod. 6
31º	1ª	7,34	7,16	7,23	7,26	7,26	7,23
	2ª	7,12	6,80	7,09	7,10	7,06	7,10
	3ª	7,10	6,80	7,06	7,08	7,06	7,09
-	média	7,19	6,92	7,13	7,15	7,13	7,14
32º	1ª	7,20	6,32	6,99	6,90	6,99	6,95
	2ª	7,28	6,88	7,23	7,20	7,29	7,19
	3ª	7,26	6,59	6,93	7,03	6,96	7,01
-	média	7,25	6,60	7,05	7,04	7,08	7,05
33º	1ª	7,26	6,74	6,99	7,00	7,00	7,09
	2ª	7,04	6,57	6,36	6,84	6,89	6,97
	3ª	7,06	6,50	6,86	6,91	6,87	6,79
-	média	7,12	6,60	6,74	6,92	6,92	6,95
34º	1ª	7,27	6,25	7,02	6,98	7,02	7,09
	2ª	7,00	6,15	6,72	6,77	6,69	6,92
	3ª	7,06	5,89	6,81	6,83	6,84	6,89
-	média	7,11	6,10	6,85	6,86	6,85	6,97
35º	1ª	6,91	5,64	6,63	6,63	6,59	6,78
	2ª	6,91	5,93	6,55	6,71	6,62	6,75
	3ª	7,14	5,87	6,58	6,92	6,84	6,99
-	média	6,99	5,81	6,59	6,75	6,68	6,84

TABELA 11: Volume em litros da solução salina acidulada (Na_2SO_4 , 25% e H_2SO_4 , 5%), coletados diariamente, para os diversos tempos de retenção (TR) e concentrações (1%, 5% e 10%).

Con- cen- tração	Tempo de Re- tenção	Dias	Biodigestor 1		Biodigestor 2		Biodigestor 3		Biodigestor 4		Biodigestor 5		Biodigestor 6	
			l	%	l	%	l	%	l	%	l	%	l	%
1%	-	1º	0,55	22,92	0,65	25,00	0,40	15,15	0,47	19,10	0,13	4,09	0,56	19,18
		2º	0,47	19,58	0,47	18,08	0,32	12,12	0,68	27,64	0,97	30,50	0,60	20,55
		3º	0,58	24,17	0,47	18,08	0,54	20,45	0,46	18,70	0,67	21,07	0,44	15,07
		4º	0,37	15,42	0,45	17,31	0,90	34,09	0,56	22,76	0,80	25,16	0,73	25,00
		5º	0,43	17,92	0,56	21,54	0,48	18,18	0,29	11,79	0,61	19,18	0,59	20,20
-	1º TR	Total	2,40	-	2,60	-	2,64	-	2,46	-	3,18	-	2,92	-
5%	-	9º	1,20	26,03	1,20	20,65	1,13	17,94	1,06	19,63	0,48	16,55	1,32	17,91
		10º	1,24	26,90	1,45	24,96	1,68	26,67	0,59	10,92	0,34	11,72	1,82	24,69
		11º	0,51	11,06	1,38	23,75	1,56	24,76	1,63	30,18	0,83	28,62	1,93	26,19
		12º	0,74	16,05	0,62	10,67	0,70	11,11	1,04	19,26	0,58	20,00	0,83	11,26
		13º	0,92	19,96	1,16	19,96	1,23	19,52	1,08	20,00	0,67	23,10	1,47	19,94
-	2º TR	Total	4,61	-	5,81	-	6,30	-	5,40	-	2,90	-	7,37	-
5%	-	16º	2,77	17,77	2,88	20,81	2,99	17,08	3,02	17,60	2,58	16,38	2,79	16,47
		17º	3,52	22,58	3,46	25,00	3,96	22,63	3,91	22,78	3,39	21,52	3,90	23,02
		18º	3,76	24,12	2,69	19,44	3,86	22,06	3,59	20,92	3,32	21,08	3,54	20,90
		19º	3,32	21,30	2,50	18,06	3,51	20,06	3,46	20,16	3,38	21,46	3,40	20,07
		20º	2,22	14,24	2,31	16,69	3,18	18,17	3,18	18,53	3,08	19,56	3,31	19,54
-	3º TR	Total	15,59	-	13,84	-	17,50	-	17,16	-	15,75	-	16,94	-
5%	-	23º	2,96	15,08	0,97	18,37	1,64	12,47	2,44	14,88	2,12	15,61	1,16	20,82
		24º	3,31	16,86	1,24	23,48	2,42	18,40	3,03	18,48	2,70	19,88	0,97	17,41
		25º	3,70	18,85	0,80	15,15	2,64	20,08	3,05	18,60	2,56	18,85	1,24	22,26
		26º	4,87	24,81	1,14	21,59	3,46	26,31	4,23	25,79	3,40	25,04	0,93	16,70
		27º	4,79	24,40	1,13	21,40	2,99	22,74	3,65	22,26	2,80	20,62	1,27	22,80
-	4º TR	Total	19,63	-	5,28	-	13,15	-	16,40	-	13,58	-	5,57	-
10%	-	31º	2,20	17,99	1,76	20,32	3,79	22,53	3,90	22,57	3,88	22,13	3,00	36,06
		32º	1,08	8,83	1,88	21,71	3,23	19,20	3,23	18,69	3,46	19,74	3,00	36,06
		33º	3,20	26,16	1,76	20,32	3,32	19,74	3,26	18,86	3,48	19,85	0,40	4,81
		34º	2,07	16,92	1,86	21,48	3,46	20,57	3,59	20,78	3,54	20,19	1,50	18,03
		35º	3,68	30,09	1,40	16,17	3,02	17,95	3,30	19,10	3,17	18,08	0,42	5,05
-	5º TR	Total	12,23	-	8,66	-	16,82	-	17,28	-	17,53	-	8,32	-

TABELA 12: Volume em litros de metano (CH₄) contido nas amostras, coletadas diariamente nos biodigestores para os diversos tempos de retenção (TR) e concentrações (1%, 5% e 10%).

Con- cen- tração	Tempo de Re- tenção	Dias	Biodigestor 1		Biodigestor 2		Biodigestor 3		Biodigestor 4		Biodigestor 5		Biodigestor 6	
			l	%	l	%	l	%	l	%	l	%	l	%
1%	-	1º	0,18	32,1	0,23	35,5	0,07	18,7	0,09	18,7	0,00	0,00	0,05	8,5
		2º	0,04	9,6	0,17	36,9	0,12	38,5	0,22	33,1	0,26	27,4	0,26	43,4
		3º	0,18	31,6	0,10	20,8	0,14	27,0	0,12	25,8	0,25	38,0	0,14	31,5
		4º	0,13	36,2	0,18	40,4	0,28	31,4	0,21	37,5	0,32	40,3	0,23	31,0
		5º	0,18	42,2	0,23	40,9	0,18	38,7	0,10	36,3	0,22	36,6	0,24	40,6
-	1º TR	Total	0,71	-	0,91	-	0,79	-	0,74	-	1,05	-	0,92	-
5%	-	9º	0,40	33,5	0,46	38,5	0,45	39,7	0,42	40,0	0,14	28,3	0,49	36,9
		10º	0,31	25,4	0,48	33,5	0,57	34,2	0,20	33,8	0,09	26,7	0,69	37,9
		11º	0,16	30,6	0,44	31,8	0,55	35,0	0,49	30,3	0,32	38,8	0,76	39,3
		12º	0,22	29,8	0,15	23,6	0,17	23,9	0,27	25,7	0,16	27,5	0,13	15,6
		13º	0,29	31,6	0,37	31,8	0,41	33,2	0,35	32,3	0,20	30,3	0,38	26,0
-	2º TR	Total	1,38	-	1,90	-	2,15	-	1,73	-	0,91	-	2,45	-
5%	-	16º	0,00	0,00	1,42	49,3	1,17	39,1	1,04	34,3	1,20	46,6	1,33	47,7
		17º	1,04	29,6	1,11	32,2	1,40	35,3	1,38	35,3	1,34	39,4	1,39	35,7
		18º	1,14	30,2	0,92	34,1	0,98	25,5	1,08	30,0	1,18	35,4	1,18	33,2
		19º	1,40	42,3	0,68	27,0	1,40	39,9	1,43	41,3	1,02	30,3	1,51	44,5
		20º	0,69	31,3	0,84	36,3	1,13	35,5	1,03	32,4	1,06	34,3	0,00	0,00
-	3º TR	Total	4,27	-	4,97	-	6,08	-	5,96	-	5,80	-	5,41	-
5%	-	23º	1,00	33,9	0,17	17,4	0,22	13,4	0,00	0,00	0,81	38,2	0,40	34,4
		24º	1,03	31,0	0,28	22,6	0,68	28,2	0,94	31,0	0,93	34,6	0,29	30,2
		25º	1,23	33,2	0,12	15,4	0,73	27,6	1,08	35,3	0,87	34,1	0,41	33,2
		26º	1,63	33,5	0,12	11,0	1,26	36,3	1,61	38,0	1,08	31,7	0,32	35,0
		27º	1,65	34,4	0,12	10,7	0,96	32,3	1,35	37,0	0,90	32,0	0,42	33,1
-	4º TR	Total	6,54	-	0,81	-	3,85	-	4,98	-	4,59	-	1,84	-
10%	-	31º	0,83	37,9	0,36	20,5	1,19	31,5	0,99	25,5	1,19	30,6	0,81	27,0
		32º	0,41	38,0	0,58	31,1	1,00	31,1	0,52	16,0	1,14	32,9	0,86	28,7
		33º	1,40	43,8	0,27	15,2	1,07	32,2	0,87	26,8	0,92	26,4	0,13	33,5
		34º	0,66	31,9	0,28	15,2	1,08	31,1	1,21	33,7	1,15	32,6	0,28	18,8
		35º	1,25	34,1	0,30	21,7	0,95	31,6	0,77	23,4	0,92	29,1	0,10	23,9
-	5º TR	Total	4,55	-	1,79	-	5,29	-	4,36	-	5,32	-	2,18	-

TABELA 13: Volume em litros de nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) contido nas amostras, coletadas diariamente nos biodigestores, para os diversos tempos de retenção (TR) e concentrações (1%, 5% e 10%).

Con- cen- tração	Tempo de Re- tenção	Dias	Biodigestor 1		Biodigestor 2		Biodigestor 3		Biodigestor 4		Biodigestor 5		Biodigestor 6	
			l	%	l	%	l	%	l	%	l	%	l	%
1%	-	1°	0,26	47,1	0,30	45,8	0,27	67,3	0,32	67,3	0,13	99,1	0,47	84,3
		2°	0,38	82,1	0,18	38,9	0,12	37,4	0,31	46,1	0,52	54,0	0,17	29,1
		3°	0,27	46,4	0,29	62,4	0,28	51,1	0,25	55,0	0,24	35,8	0,19	43,7
		4°	0,14	37,3	0,12	27,6	0,25	27,8	0,20	35,8	0,26	32,4	0,22	30,6
		5°	0,12	26,8	0,16	28,7	0,15	31,3	0,11	37,7	0,30	50,1	0,21	35,8
-	1° TR	Total	1,17	-	1,05	-	1,07	-	1,19	-	1,45	-	1,26	-
5%	-	9°	0,35	28,9	0,33	27,5	0,31	27,7	0,27	25,8	0,14	28,9	0,40	30,3
		10°	0,42	34,1	0,36	24,6	0,42	25,1	0,14	24,2	0,14	40,5	0,47	25,9
		11°	0,14	26,9	0,36	26,1	0,38	24,5	0,45	27,6	0,21	25,6	0,66	34,1
		12°	0,20	27,2	0,19	30,8	0,23	32,9	0,34	32,5	0,20	35,2	0,27	32,1
		13°	0,30	33,1	0,32	27,2	0,34	27,6	0,30	27,5	0,22	32,6	0,45	30,6
-	2° TR	Total	1,41	-	1,56	-	1,68	-	1,50	-	0,91	-	2,25	-
5%	-	16°	2,77	100,0	0,61	21,3	0,90	30,2	0,92	30,6	0,70	27,3	0,62	22,2
		17°	1,19	33,9	1,20	34,8	0,99	25,1	1,06	27,0	0,85	25,0	1,10	28,3
		18°	1,40	37,2	0,92	34,2	1,56	40,3	1,12	31,3	1,07	32,2	0,98	27,7
		19°	0,91	27,3	0,74	29,8	0,96	27,4	0,72	20,9	1,73	51,1	0,70	20,7
		20°	0,84	37,7	0,80	34,7	0,77	24,2	0,82	25,9	1,16	37,7	3,31	100,0
-	3° TR	Total	7,11	-	4,27	-	5,18	-	4,64	-	5,51	-	6,71	-
5%	-	23°	0,91	30,8	0,36	37,2	1,17	71,5	2,40	98,2	0,60	28,4	0,33	28,2
		24°	1,25	37,8	0,52	41,8	1,00	41,2	1,15	38,1	0,99	36,7	0,36	36,8
		25°	1,21	32,7	0,31	38,7	1,12	42,4	1,43	46,8	0,82	32,1	0,38	30,6
		26°	1,59	32,6	0,46	40,4	0,96	27,7	1,10	26,0	1,07	31,4	0,26	27,8
		27°	1,42	29,6	0,40	35,5	0,88	29,3	0,90	24,6	0,89	31,8	0,39	30,5
-	4° TR	Total	6,38	-	2,05	-	5,13	-	6,98	-	4,37	-	1,72	-
10%	-	31°	0,71	32,1	0,63	35,7	1,14	30,2	1,40	36,0	1,38	35,7	1,28	42,5
		32°	0,46	42,9	0,56	29,6	0,96	29,6	1,38	42,8	1,24	35,7	1,31	43,8
		33°	0,72	22,5	0,80	45,3	1,09	32,8	1,18	36,2	1,50	43,1	0,12	31,1
		34°	0,64	31,0	0,60	32,2	0,98	28,3	1,04	29,0	1,00	28,3	0,79	52,5
		35°	1,00	27,2	0,52	37,2	0,95	31,4	1,36	41,2	1,03	32,5	0,16	37,3
-	5° TR	Total	3,53	-	3,11	-	5,12	-	6,36	-	6,15	-	3,66	-

TABELA 14: Volume em litros de gás carbônico (CO₂) contido nas amostras, coletadas diariamente nos biodigestores, para os diversos tempos de retenção (TR) e concentrações (1%, 5% e 10%).

Con- cen- tração	Tempo de Re- tenção	Dias	Biodigestor 1		Biodigestor 2		Biodigestor 3		Biodigestor 4		Biodigestor 5		Biodigestor 6	
			l	%	l	%	l	%	l	%	l	%	l	%
1%	-	1º	0,11	20,8	0,12	18,7	0,06	14,0	0,06	14,0	0,00	0,9	0,04	7,2
		2º	0,05	08,3	0,12	24,2	0,08	24,0	0,15	20,8	0,19	18,6	0,17	27,6
		3º	0,13	22,0	0,08	16,7	0,12	21,9	0,09	19,2	0,18	26,2	0,11	24,9
		4º	0,10	26,4	0,15	32,0	0,37	31,4	0,15	26,7	0,22	27,3	0,28	29,5
		5º	0,13	31,0	0,17	30,4	0,15	30,0	0,08	26,0	0,09	19,3	0,14	27,3
-	1º TR	Total	0,52	-	0,64	-	0,78	-	0,53	-	0,68	-	0,74	-
5%	-	9º	0,45	37,6	0,41	34,0	0,37	32,6	0,37	34,2	0,20	42,8	0,43	31,8
		10º	0,51	40,5	0,61	41,9	0,69	40,7	0,25	42,0	0,11	32,8	0,66	34,9
		11º	0,21	42,5	0,58	42,1	0,63	40,5	0,69	42,1	0,30	35,6	0,51	50,2
		12º	0,32	43,0	0,28	45,6	0,30	43,1	0,43	41,1	0,22	37,3	0,43	41,1
		13º	0,33	35,3	0,47	41,0	0,48	39,2	0,43	40,1	0,25	37,1	0,64	43,4
-	2º TR	Total	1,82	-	2,35	-	2,47	-	2,17	-	1,08	-	2,67	-
5%	-	16º	0,00	0,00	0,85	29,5	0,92	30,7	1,06	35,1	0,68	26,1	0,84	30,1
		17º	1,29	36,4	1,15	33,0	1,57	39,6	1,47	37,7	1,20	35,6	1,41	36,0
		18º	1,22	32,6	0,85	31,7	1,32	34,2	1,39	38,7	1,07	32,4	1,38	39,2
		19º	1,01	30,4	1,08	43,3	1,15	32,7	1,31	37,9	0,63	18,6	1,19	34,8
		20º	0,69	11,0	0,67	29,0	1,28	40,3	1,33	41,7	0,86	28,0	0,00	0,00
-	3º TR	Total	4,21	-	4,60	-	6,24	-	6,56	-	4,44	-	4,82	-
5%	-	23º	1,05	35,3	0,44	45,4	0,25	15,1	0,04	1,8	0,71	33,4	0,43	37,3
		24º	1,03	31,1	0,44	35,6	0,74	30,6	0,94	30,9	0,78	28,7	0,32	32,9
		25º	1,26	34,1	0,37	45,9	0,79	30,0	0,54	17,9	0,87	33,8	0,45	36,2
		26º	1,65	33,8	0,56	48,6	1,24	36,0	1,52	36,0	1,25	36,9	0,35	37,2
		27º	1,72	35,9	0,61	53,8	1,15	38,4	1,40	38,4	1,01	36,2	0,46	36,4
-	4º TR	Total	6,71	-	2,42	-	4,17	-	4,44	-	4,62	-	2,01	-
10%	-	31º	0,66	30,0	0,77	43,8	1,46	38,3	1,51	38,5	1,31	33,7	0,91	30,5
		32º	0,21	19,1	0,74	39,3	1,27	39,3	1,33	41,2	1,08	31,4	0,83	27,5
		33º	1,08	33,9	0,69	39,5	1,16	34,0	1,21	37,0	1,06	30,5	0,15	35,4
		34º	0,77	37,1	0,98	52,6	1,40	40,6	1,34	37,3	1,39	39,1	0,43	29,0
		35º	1,43	38,7	0,58	41,1	1,12	37,0	1,17	35,3	1,22	38,4	0,16	38,8
-	5º TR	Total	4,15	-	3,76	-	6,41	-	6,56	-	6,06	-	2,48	-

TABELA 15: Remoção de DQO obtida na digestão anaeróbica do soro de queijo, utilizando diferentes cargas orgânicas diárias nos biodigestores, em escala laboratorial.

Con- cen- tração	Tempo de Re- tenção	Dias	Biodigestor 1		Biodigestor 2		Biodigestor 3		Biodigestor 4		Biodigestor 5		Biodigestor 6	
			g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
1%	-	1º	0,7	53,8	0,4	30,8	0,7	53,8	0,6	46,2	0,8	61,5	0,6	46,2
		2º	0,6	46,2	0,8	61,5	0,7	53,8	0,6	46,2	0,6	46,2	0,5	38,5
		3º	0,7	53,8	0,8	61,5	0,5	38,5	0,2	15,4	0,4	30,8	0,5	38,5
		4º	0,4	30,8	0,5	38,5	0,4	30,8	0,7	53,8	0,5	38,5	0,2	15,4
		5º	0,6	46,2	0,6	46,2	0,4	30,8	0,4	30,8	0,5	38,5	0,2	15,4
-	1º TR	Total	3,0	-	3,1	-	2,7	-	2,5	-	2,8	-	2,0	-
5%	-	9º	3,5	64,8	3,8	70,4	3,5	64,8	2,9	53,7	2,4	44,4	3,7	68,5
		10º	2,0	37,0	3,1	57,4	1,3	24,1	3,0	55,6	3,6	66,7	1,9	35,2
		11º	4,2	77,8	1,8	33,3	2,8	51,8	3,2	59,2	2,3	42,6	1,4	25,9
		12º	2,4	44,4	3,3	61,1	2,8	51,8	2,8	51,8	3,6	66,7	3,6	66,7
		13º	1,5	27,8	2,8	51,8	3,1	57,4	2,8	51,8	4,0	74,1	2,8	51,8
-	2º TR	Total	13,6	-	14,8	-	13,5	-	14,7	-	15,9	-	13,4	-
5%	-	16º	3,0	55,6	3,4	63,0	4,4	81,5	3,3	61,1	2,9	53,7	3,2	59,2
		17º	4,4	81,5	2,8	51,8	1,6	29,6	2,5	46,3	3,0	55,6	2,9	53,7
		18º	2,6	48,1	3,7	68,5	3,4	63,0	3,2	59,2	4,2	77,8	2,4	44,4
		19º	3,1	57,4	1,3	24,1	2,6	48,1	1,7	31,5	2,4	44,4	2,7	50,0
		20º	3,3	61,1	4,4	81,5	3,4	63,0	2,8	51,8	3,4	63,0	2,7	50,0
-	3º TR	Total	16,4	-	15,6	-	15,4	-	13,5	-	15,9	-	13,9	-
5%	-	23º	2,6	48,1	3,9	72,2	3,4	63,0	2,7	50,0	3,2	59,2	2,5	46,3
		24º	3,6	66,7	4,0	74,1	2,8	51,8	3,0	55,6	3,1	57,4	3,0	55,6
		25º	3,8	70,4	2,8	51,8	3,3	61,1	3,2	59,2	2,0	37,0	2,9	53,7
		26º	2,7	50,0	3,1	57,4	2,6	48,1	3,5	64,8	3,1	57,4	3,7	68,5
		27º	3,0	55,6	2,6	48,1	2,4	44,4	2,8	51,8	3,0	55,6	1,8	33,3
-	4º TR	Total	15,7	-	16,4	-	14,5	-	15,2	-	14,4	-	13,9	-
10%	-	31º	8,3	80,6	2,5	24,3	5,7	55,3	4,9	47,6	5,1	49,5	6,7	65,0
		32º	0,7	6,8	2,2	21,4	4,6	44,7	2,3	22,3	4,5	43,7	2,5	24,3
		33º	5,1	49,5	3,2	31,1	4,5	43,7	3,1	30,1	3,7	35,9	7,4	71,8
		34º	2,5	24,3	2,9	28,2	2,9	28,2	4,0	38,8	3,4	33,0	4,7	45,6
		35º	7,3	70,9	5,1	49,5	3,8	36,9	0,5	4,8	4,4	42,7	4,2	40,8
-	5º TR	Total	23,9	-	15,9	-	21,5	-	14,8	-	21,1	-	25,5	-

TABELA 16: Teor de Sólidos Totais (ST), em percentagem, de amostras dos efluentes dos sistemas operacionais, para cada concentração e sistema de alimentação.

Concen- tração	Sistema de alimentação diário	Número de amostras/ biodigestor	Sistemas Operacionais						Média das Médias	Coeficiente de Variação (C.V. %)
			Biod. 1	Biod. 2	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 5	Biod. 6		
II	único	1	4,76	3,87	4,85	3,98	4,12	4,86	-	-
		2	3,49	3,28	4,77	3,70	3,45	4,42	-	-
		3	4,19	2,65	2,77	3,61	3,79	2,43	-	-
-	1º IR	média	4,25	3,27	4,13	3,76	3,79	3,90	3,83	19,55
SI	único	1	5,18	4,76	3,15	4,07	4,32	4,86	-	-
		2	2,44	2,49	4,03	3,16	3,27	4,42	-	-
		3	3,42	4,92	3,32	3,73	3,35	2,43	-	-
-	2º IR	média	3,68	4,06	3,50	3,65	3,65	3,90	3,80	23,43
SI	3 vezes	1	5,08	4,10	3,63	4,15	5,14	4,86	-	-
		2	2,97	2,64	3,24	3,86	3,56	4,12	-	-
		3	3,44	3,94	3,24	3,47	3,58	3,88	-	-
-	3º IR	média	3,83	3,56	3,37	3,83	4,09	4,29	3,74	17,34
SI	8 vezes	1	4,28	4,57	3,20	4,13	3,21	3,92	-	-
		2	3,52	3,56	2,40	3,71	2,34	3,19	-	-
		3	4,86	3,37	2,92	4,68	3,65	4,15	-	-
-	4º IR	média	4,22	3,83	2,84	4,17	3,07	3,75	3,64	22,25
IOI	5 vezes	1	4,10	3,92	4,01	3,92	4,31	4,48	-	-
		2	3,79	3,47	3,23	3,76	4,81	2,36	-	-
		3	4,51	4,16	3,54	2,81	4,05	4,37	-	-
-	5º IR	média	4,13	3,85	3,59	3,50	4,39	3,74	3,94	12,08

TABELA 17: Número médio de bactérias anaeróbicas (NB) presentes nos efluentes dos biodigestores, para cada concentração e sistema de alimentação

Concen- tração	Sistema de alimentação diário	Número de amostras/ biodigestor	Sistemas Operacionais						Média das Médias	Coeficiente de Variação (C.V. %)
			Biod. 1	Biod. 2	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 5	Biod. 6		
1%	único	Tubo 1	47	41	43	37	43	50	-	-
		Tubo 2	34	27	51	38	37	43	-	-
		Tubo 3	39	35	29	43	39	37	-	-
		média	40	34	41	39	40	43	40	16,06
5%	único	Tubo 1	54	51	27	46	46	53	-	-
		Tubo 2	27	25	48	33	34	49	-	-
		Tubo 3	33	50	34	35	34	31	-	-
		média	38	42	36	38	38	44	39	25,14
5%	3 vezes	Tubo 1	53	40	43	37	45	37	-	-
		Tubo 2	31	20	35	24	24	47	-	-
		Tubo 3	35	28	51	34	46	35	-	-
		média	40	29	43	32	38	40	37	25,48
5%	8 vezes	Tubo 1	43	33	33	46	49	44	-	-
		Tubo 2	38	25	24	24	32	36	-	-
		Tubo 3	48	30	38	45	38	50	-	-
		média	43	29	32	38	40	43	38	22,84
10%	5 vezes	Tubo 1	42	40	45	46	42	41	-	-
		Tubo 2	33	39	50	44	39	36	-	-
		Tubo 3	37	29	42	41	47	43	-	-
		média	37	36	46	44	43	40	41	12,32

TABELA 18: Teor de Açúcares Redutores Totais (ART %) em percentagem, de amostras dos efluentes dos sistemas operacionais, para cada concentração e sistema de alimentação.

Concen- tração	Sistema de alimentação diário	Número de amostras/ biodigestor	Sistemas Operacionais						Média das Médias	Coeficiente de Variação (C.V. %)
			Biod. 1	Biod. 2	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 5	Biod. 6		
1%	único	1	0,85	0,99	1,17	1,10	1,00	1,10	-	-
		2	0,76	0,97	1,10	1,00	1,10	1,00	-	-
		3	0,90	1,10	0,90	0,90	0,93	0,80	-	-
		média	0,84	1,02	1,06	1,00	1,01	0,97	0,98	11,82
5%	único	1	0,90	0,76	0,70	0,70	0,80	0,93	-	-
		2	0,80	0,76	0,90	0,99	1,10	0,90	-	-
		3	1,10	0,90	0,80	0,70	0,90	0,80	-	-
		média	0,93	0,81	0,80	0,80	0,93	0,88	0,86	14,31
5%	3 vezes	1	0,65	0,60	0,52	0,65	0,51	0,60	-	-
		2	0,77	0,48	0,76	0,52	0,65	0,55	-	-
		3	0,57	0,52	0,61	0,76	0,74	0,65	-	-
		média	0,66	0,53	0,63	0,64	0,63	0,60	0,62	15,20
5%	8 vezes	1	0,82	0,60	0,48	0,95	0,65	0,65	-	-
		2	0,57	0,77	0,60	0,78	0,52	0,57	-	-
		3	0,61	0,57	0,46	1,10	0,48	0,55	-	-
		média	0,67	0,65	0,51	0,94	0,55	0,59	0,65	26,30
10%	5 vezes	1	0,81	0,87	0,62	0,84	0,65	0,64	-	-
		2	0,46	0,83	0,51	0,66	0,40	0,57	-	-
		3	0,60	0,40	0,50	0,70	0,61	0,50	-	-
		média	0,62	0,70	0,54	0,73	0,55	0,57	0,62	23,67

TABELA 19: Análise de variância de alguns fatores, considerando um experimento inteiramente casualizado em relação ao sistema de alimentação dos biodigestores.

Sistema de alimentação dos biodigestores	FATORES ANALISADOS			
	ph	(Na ₂ SO ₄ + H ₂ SO ₄) l	(CH ₄) %	(CO ₂) %
5 alimentações/dia	6,9 b	2,69 b	28,7 a	36,3 a
6 alimentações/dia	6,6 c	2,45 b	28,6 a	34,1 a
3 alimentações/dia	7,2 a	3,23 a	34,7 a	30,9 a
1 alimentação/dia	6,8 b	0,81 c	31,2 a	30,9 a

* As médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan (p 0,05).