

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,  
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE FILTRO  
ANAERÓBIO UTILIZADO PARA O TRATAMENTO DE  
EFLUENTES LÍQUIDOS DE UMA INDÚSTRIA DE  
LATICÍNIOS – ESTUDO DE CASO**

**André Luiz Gomes**

**Belo Horizonte  
2006**

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE FILTRO  
ANAERÓBIO UTILIZADO PARA O TRATAMENTO DE  
EFLUENTES LÍQUIDOS DE UMA INDÚSTRIA DE  
LATICÍNIOS – ESTUDO DE CASO**

**André Luiz Gomes**

André Luiz Gomes

# **ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE FILTRO ANAERÓBIO UTILIZADO PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS – ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Digestão anaeróbia e técnicas de tratamento e pós-tratamento de esgotos

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Escola de Engenharia  
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

2006

G633a	<p>Gomes, André Luiz  Análise técnico-econômica de filtro anaeróbio utilizado para o tratamento de efluentes líquidos de uma indústria de laticínios [manuscrito]: estudo de caso / André Luiz Gomes – 2006.  99 f. , enc. : il.</p> <p>Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 91-94</p> <p>Anexos: f. 95-99</p> <p>1. Meio ambiente – Teses. 2. Digestão anaeróbica – Teses. 3. Águas residuais – Purificação – Filtração – Teses. 4. Resíduos industriais – Aspectos ambientais – Teses. I. Chernicharo, Carlos Augusto Lemos. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628.3(043)</p>
-------	--

## **DEDICATÓRIA**

À memória do meu pai João Luiz Gomes, que tanto se empenhou para a minha formação.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos sócios da Engenho Nove, Artur Torres e José Andrade, pelo incentivo e pelo apoio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa;

Aos diretores do Laticínio Trevo Rural, em especial ao Reginaldo, pela disponibilização das estruturas da empresa;

Ao professor Carlos Augusto pela orientação, paciência e tolerância com a minha falta de tempo;

Ao Márcio, funcionário do Laticínio Trevo Rural, pelo apoio nas coletas das amostras;

Aos colegas da Engenho Nove, Érica, Miriam, João Luiz, Daniela, Raquel e Agnaldo pelo apoio e colaboração;

À Norma, Elizabeth, Graziella, do laboratório do DESA, pela preciosa colaboração e pelo rigor técnico nas análises;

Aos meus pais, Sr. João e dona Bá, por minha formação e pelos ensinamentos;

À minha querida esposa Lílian, pela revisão do texto, companheirismo, apoio e incentivo.

Aos meus queridos filhos Jota e Lô, razão da minha vida.

“Não chegar ao fim é o que faz a tua grandeza.”

Goethe

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS</b>	i
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	iii
<b>LISTA DE TABELAS</b>	v
<b>1 - INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2 - OBJETIVOS</b>	4
2.1 - Objetivo Geral	4
2.2 - Objetivos específicos	4
<b>3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	5
3.1 - Caracterização da poluição gerada pelas indústrias de laticínios	5
3.1.1 - Natureza dos efluentes líquidos	7
3.1.2 - Características físico-químicas dos efluentes líquidos de laticínios	8
3.1.3 - Vazão dos efluentes líquidos em indústrias de laticínios	13
3.2 - Redução e controle de efluentes líquidos em laticínios	16
3.3 - Tratamento de efluentes líquidos	19
3.3.1 - Tecnologias utilizadas para o tratamento de efluentes líquidos em laticínios	21
3.3.1.1 - Processos aeróbios	21
3.3.1.2 - Processos anaeróbios	22
3.4 - Fundamentos da digestão anaeróbia	25
3.4.1 - Hidrólise	26
3.4.2 - Acidogênese	26
3.4.3 - Acetogênese	28
3.4.4 - Metanogênese	28
3.4.4.1 - Metanogênicas acetoclásticas	29
3.4.4.2 - Metanogênicas hidrogenotróficas	29
3.4.5 - Sulfetogênese	31
3.5 - Fatores ambientais que afetam o processo anaeróbio	31

3.5.1 - pH, alcalinidade e ácidos voláteis	32
3.5.2 - Temperatura	32
3.5.3 - Nutrientes	33
3.5.4 - Compostos tóxicos	33
3.6 - Degradação de matéria orgânica específica	34
3.6.1 - Lipídios	34
3.6.2 - Substratos complexos	36
3.7 - Tratamento de efluentes com a utilização de filtro anaeróbio	37
3.8 - Tratamento de efluentes em laticínios utilizando filtro anaeróbio	37
3.9 - Análise crítica da literatura e contribuição do presente estudo	40
<b>4 – MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>41</b>
4.1 – Caracterização da indústria de laticínios estudada	41
4.1.1 - Preliminares	41
4.1.2 – Produtos fabricados	41
4.1.3 – Descritivo do processamento industrial	41
4.1.3.1 - Recepção/padronização – “Premix”	42
4.1.3.2 - Produção de Iogurte	43
4.1.3.3 - Produção de “petit – suisse”	44
4.1.3.4 - Produção de manteiga	45
4.1.3.5 - Produção de requeijão cremoso	47
4.1.4 – Utilização da água	49
4.1.4.1 - Fontes de abastecimento	49
4.1.4.2 - Armazenamento e usos	49
4.1.4.3 - Balanço hídrico	50
4.2 - Caracterização dos despejos líquidos	50
4.3 – Descrição da estação de tratamento de efluentes	51
4.3.1 - Adaptações necessárias na ETE	55
4.4 – Condições operacionais do filtro	56
4.5 - Programa de monitoramento	57
4.6 - Planejamento dos experimentos	57
<b>5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>60</b>
5.1 - Análise preliminar dos resultados	60
5.1.1 - Demanda química de oxigênio total, DQO <sub>t</sub>	61

5.1.2 - Sólidos suspensos totais, SST	62
5.1.3 - Óleos e graxas	63
5.2 - Perfil do decaimento da matéria orgânica no filtro anaeróbio	65
5.2.1 - Avaliação crítica dos principais parâmetros	65
5.2.1.1 - Diagramas de Box-Whisker	67
5.2.2 - Alcalinidade	67
5.2.3 – Ácidos graxos voláteis	68
5.2.3.1 - Perfil de decaimento da ácidos graxos voláteis no filtro anaeróbio	68
Ácido acético	69
Ácido propiônico	70
Ácido isobutírico	70
Ácido butírico	71
Ácido isovalérico	72
Ácido valérico	72
5.3 - Custos de implantação e operação de lodos ativados x filtro anaeróbio	73
5.3.1 - Sistema de lodos ativados convencional	74
5.3.2 - Filtro anaeróbio	77
5.3.3 - Comparativo de custos de implantação de diversos sistemas	84
5.3.4 - Comparativo de custos de construção e operação dos sistemas de filtro anaeróbio e lodos ativados	86
<b>6 – CONCLUSÕES</b>	88
6.1 - Eficiência do sistema de tratamento	88
6.2 - Estabilidade do filtro anaeróbio	88
6.3 - Custos de implantação e operação	89
<b>7 – RECOMENDAÇÕES</b>	90
<b>8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	91
<b>9 – ANEXOS</b>	95
9.1- Anexo I	95
9.1.1 - Detalhamento das planilhas de custos – Filtro anaeróbio 1	95
9.1.2 - Detalhamento das planilhas de custos – Filtro anaeróbio 2	96
9.1.3 - Detalhamento das planilhas de custos – Lodos ativados	98

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AGV – Ácidos graxos voláteis  
BAS – Biofiltro aerado submerso  
BMZ – Ministério de Cooperação Econômica e Desenvolvimento Alemão  
CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear  
CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais  
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
CIP – Clean in Place  
COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental  
COT – Carbono orgânico total  
COV – Carga orgânica volumétrica  
CUB – Custo unitário básico  
DBO – Demanda bioquímica de oxigênio  
DESA – Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária  
DN – Deliberação normativa  
DQO – Demanda química de oxigênio  
DS – Disposição no solo  
EPA – Environmental Protection Agency  
ETE – Estação de tratamento de esgoto  
EUA – Estados Unidos da América  
FA – Filtro anaeróbio  
FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais  
FBP – Filtro biológico percolador  
FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente  
FIEMG – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais  
GTZ – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit  
IDF – International Dairy Federation  
LA – Lodos ativados  
OG – Óleos e graxas  
OCEMG – Sindicato e Organização das Cooperativas do Estado de Minas Gerais  
ONU – Organização das Nações Unidas  
SEBRAE – Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas de Minas Gerais  
SINDUSCOM – Sindicato das Indústrias da Construção Civil  
SST – Sólidos suspensos totais

SSV – Sólidos suspensos voláteis

ST – Sólidos totais

SVT – Sólidos voláteis totais

TDH – Tempo de detenção hidráulica

UASB – Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fluxograma geral de um sistema de tratamento de efluentes	20
Figura 3.2 - Fluxograma da digestão anaeróbia e grupos de microrganismos envolvidos	30
Figura 3.3 - Ação da lipase na hidrólise de lipídios	35
Figura 4.1 - Fluxograma geral do processamento industrial	42
Figura 4.2 - Fluxograma de fabricação do “premix”	42
Figura 4.3 - Fluxograma de fabricação do iogurte	43
Figura 4.4 - Fluxograma de fabricação do “petit suisse”	44
Figura 4.5 - Fluxograma da fabricação de manteiga	46
Figura 4.6 - Fluxograma da fabricação de requeijão cremoso	48
Figura 4.7 - Fluxograma do balanço hídrico	50
Figura 4.8 - Fluxograma do tratamento de efluentes e os respectivos pontos de amostragem	51
Figura 4.9 - Caixa de gordura	52
Figura 4.10 - Peneira estática	52
Figura 4.11 - Elevatória, equalizador e flotador	53
Figura 4.12 - Caixa de distribuição de fluxo	54
Figura 4.13 - Vista do filtro anaeróbio	54
Figura 4.14 - Vista dos tubos coletores ao longo da altura do filtro	56
Figura 5.1 - Perfil das concentrações de $DQO_t$ em função dos pontos de amostragem	62
Figura 5.2 - Série temporal dos valores das concentrações de $DQO_t$	62
Figura 5.3 - Série temporal da eficiência global do sistema para remoção de $DQO_t$	62
Figura 5.4 - Percentis de atendimento à legislação para $DQO_t$	62
Figura 5.5 - Perfil das concentrações de SST em função dos pontos de amostragem	63
Figura 5.6 - Série temporal dos valores das concentrações de SST	63
Figura 5.7 - Série temporal da eficiência global do sistema para remoção de SST	63
Figura 5.8 - Percentis de atendimento à legislação para SST	63
Figura 5.9 - Perfil das concentrações de Óleos e graxas em função dos pontos de amostragem	64
Figura 5.10 - Série temporal dos valores das concentrações de OG	64
Figura 5.11 - Série temporal da eficiência global do sistema para remoção de OG	64
Figura 5.12 - Percentis de atendimento à legislação para OG	64
Figura 5.13 - Correlação entre a $DQO_t$ e $DQO_f$	66

Figura 5.14 - Perfil das concentrações de DQO total em função da altura do meio suporte	67
Figura 5.15 - Perfil da eficiência de decaimento de DQO total em função do TDH e COV	67
Figura 5.16 - Perfil da alcalinidade em função dos pontos de amostragem	68
Figura 5.17 - Série temporal dos valores da alcalinidade	68
Figura 5.18 - Perfil das concentrações de ácido acético em função dos pontos de amostragem	70
Figura 5.19 - Perfil das concentrações de ácido propiônico em função dos pontos de amostragem	70
Figura 5.20 - Perfil das concentrações de ácido isobutírico em função dos pontos de amostragem	71
Figura 5.21 - Perfil das concentrações de ácido butírico em função dos pontos de amostragem	71
Figura 5.22 - Perfil das concentrações de ácido isovalérico em função dos pontos de amostragem	72
Figura 5.23 - Perfil das concentrações de ácido valérico em função dos pontos de amostragem	72
Figura 5.24 - Fluxograma do processo de lodos ativados proposto	75
Figura 5.25 - Planta e corte AA do decantador primário	76
Figura 5.26 - Planta e corte AA do decantador secundário	76
Figura 5.27 - Planta e corte AA do tanque de aeração	77
Figura 5.28 - Perspectiva do filtro anaeróbio proposto	78
Figura 5.29 - Planta nível inferior do filtro anaeróbio proposto	79
Figura 5.30 - Corte AA do filtro anaeróbio proposto (meio suporte)	79
Figura 5.31 - Planta baixa nível superior do filtro anaeróbio proposto	80
Figura 5.32 - Corte AA do filtro anaeróbio proposto (sistema de distribuição afluente)	80
Figura 5.33 - Custo de implantação do sistema de filtro anaeróbio e lodos ativados em função das diversas etapas de construção	82
Figura 5.34 - Custo de implantação do sistema de filtro anaeróbio com diversas variáveis	83
Figura 5.35 - Comparativo de custos de implantação de diversos sistemas	85
Figura 5.36 - Comparativo de custos de implantação e operação (horizonte de 2,5 anos)	87
Figura 5.37 - Comparativo de custos de implantação e operação (horizonte de 10 anos)	87
Figura 6.1 - Percentis de atendimento à legislação para DQOt – Estimada para o ponto10	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Principais fontes geradoras de efluentes líquidos em laticínios	6
Tabela 3.2 - Características físico-químicas de efluentes industriais de fábricas de laticínios nos EUA e na Nova Zelândia	9
Tabela 3.3 - Características físico-químicas médias de efluentes líquidos industriais de diferentes tipos de indústrias de laticínios	9
Tabela 3.4 - Valores da carga específica de $DBO_5$ para efluentes líquidos industriais de diferentes tipos de indústrias de laticínios	10
Tabela 3.5 - Valores da carga específica de $DBO_5$ para efluentes líquidos industriais de várias operações de indústrias de laticínios, inclusive metas que podem ser atingidas por esforços razoáveis	11
Tabela 3.6 - Valores das relações $DBO_5/DQO$ e $COT/DQO$ , para alguns produtos	12
Tabela 3.7 - Demanda bioquímica de oxigênio ( $DBO_5$ ) e Demanda química de oxigênio ( $DQO$ ) de alguns produtos lácteos fluidos	13
Tabela 3.8 - Valores do coeficiente de volume de efluentes líquidos em indústrias de laticínios	14
Tabela 3.9 - Variação e média das taxas de consumo de água das indústrias de laticínios	15
Tabela 3.10 - Taxas aproximadas de consumo de água (em L de água/L de leite recebido) para a fabricação de vários produtos lácteos	15
Tabela 3.11 - Ações para controle de efluentes líquidos	17
Tabela 3.12 - Efeito de ações para a redução e controle de efluentes líquidos em indústrias de laticínios nos EUA	18
Tabela 3.13 - Níveis de tratamento de efluentes	20
Tabela 3.14 - Comparativo das principais vantagens e limitações do sistema de lodos ativados	22
Tabela 3.15 - Principais indústrias cujos efluentes podem ser tratados pela via anaeróbia	22
Tabela 3.16 - Análise comparativa das principais vantagens e limitações dos sistemas anaeróbios	23
Tabela 3.17 - Principais sistemas de tratamento de efluentes utilizados nas indústrias de laticínios	24
Tabela 3.18 - Análise comparativa das principais características dos sistemas de tratamento	25
Tabela 3.19 - Condições ambientais ótimas para os microrganismos anaeróbios	31

Tabela 3.20 - Composição química do efluente do laticínio no estudo de Kasapgil	38
Tabela 3.21 - Composição química do efluente do laticínio no estudo de Ince	40
Tabela 3.22 - Principais parâmetros em síntese da revisão bibliográfica para efluentes de laticínios	40
Tabela 4.1 - Produtos fabricados	41
Tabela 4.2 - Capacidade de armazenamento	49
Tabela 4.3 - Características das unidades que compõem o tratamento primário	55
Tabela 4.4 - Características principais do filtro anaeróbio	55
Tabela 4.5 - Condições operacionais do filtro anaeróbio	56
Tabela 4.6 - Universo de amostragem	57
Tabela 4.7 - Resumo das etapas com seu respectivo período operacional	58
Tabela 5.1 - Dados estatísticos básicos da análise preliminar	60
Tabela 5.2 - Dados estatísticos básicos da eficiência global do sistema	61
Tabela 5.3 - Comparativo dos principais parâmetros avaliados	65
Tabela 5.4 - Variação dos principais parâmetros do filtro anaeróbio ao longo da altura do meio suporte	66
Tabela 5.5 - Dados estatísticos básicos para DQO <sub>f</sub> e ácidos graxos voláteis	69
Tabela 5.6 - Comparativo de custos de implantação de diversos tipos de tratamento	73
Tabela 5.7 - Parâmetros de pré-dimensionamento adotados para o sistema de lodos ativados	74
Tabela 5.8 - Estimativa de custos resumida para implantação do sistema de lodos ativados	81
Tabela 5.9 - Estimativa de custos resumida para implantação do filtro anaeróbio 1	81
Tabela 5.10 - Estimativa de custos resumida para implantação do filtro anaeróbio 2	82
Tabela 5.11 - Comparativo de custos de implantação de filtro anaeróbio com duas variáveis	83
Tabela 5.12 - Comparativo de custos de implantação de sistema completo de tratamento de efluentes líquidos industriais com duas variáveis	84
Tabela 5.13 - Comparativo de custos de implantação e operação de sistemas completos de tratamento de efluentes líquidos industriais	87

## RESUMO

A cadeia agroindustrial de leite no Brasil é uma das mais importantes, tanto pela questão econômica quanto pela social. Diante das características do setor surgem também problemas ligados, principalmente, ao controle ambiental, pois as indústrias de laticínios produzem razoável quantidade de efluentes líquidos e com carga orgânica elevada. O Estado de Minas Gerais, por exemplo, possui cerca de 1250 indústrias de laticínios formalmente constituídas, sem qualquer tipo de tratamento de seus efluentes líquidos, lançando-os diretamente nos corpos receptores.

A opção pela utilização de somente uma fase anaeróbia, como tratamento dos efluentes gerados pela atividade, capaz de reduzir as concentrações de matéria orgânica em níveis aceitáveis pela legislação, exige um maior conhecimento a respeito do funcionamento do filtro anaeróbio.

O presente trabalho aborda a avaliação de desempenho de um filtro anaeróbio, em escala real, utilizado para o tratamento de efluentes de uma indústria de laticínios de médio porte. O foco principal do trabalho é a análise da influência da altura da camada de meio suporte no desempenho verificado em cada compartimento vertical do filtro, assim como o comparativo de custos de implantação e operação com o sistema de lodos ativados. O fluxograma do sistema de tratamento incorpora unidades de peneiramento estático, de neutralização e equalização de vazão e de flotação, além do filtro anaeróbio objeto do estudo. O filtro apresenta volume útil total de  $997 \text{ m}^3$ , sendo que o meio suporte (brita no. 4 de escória de alto forno) ocupa um volume de  $862 \text{ m}^3$ .

Após 12 meses de monitoramento ininterrupto, verificou-se que as concentrações e as eficiências de remoção de DQO filtrada não se alteraram substancialmente já a partir da altura de meio suporte de 0,60 m, correspondente aos seguintes parâmetros operacionais do filtro anaeróbio: TDH = 76 h e COV =  $0,63 \text{ kgDQO/m}^3\cdot\text{d}$ . As concentrações de ácidos graxos voláteis no interior do filtro foram muito baixas durante todo o período operacional, indicando a sua rápida conversão em gás metano. No todo, o sistema de tratamento apresentou um bom desempenho, sendo que a eficiência global de remoção de DQO do sistema atendeu de forma bastante satisfatória a legislação vigente no Estado de Minas Gerais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Filtro anaeróbio, efluentes industriais, efluentes de laticínios, tratamento de efluentes.

## **ABSTRACT**

The dairy activity is one of the most important industries in Brazil, both economically and socially. Problems, mostly connected with environment protection also arise before the characteristics of the sector, for the dairy industry produces a fair amount of effluents with high organic load. There are, for instance, around 1,250 fully accredited dairy industries in the State of Minas Gerais alone with their waste being discharged into river basins without any form of effluent treatment whatsoever.

As a means of treatment for the raw effluent produced by the activity, the option of using only one anaerobic phase capable of reducing the organic matter concentrations to levels accepted by the legislation requires a greater understanding of the anaerobic filter operation.

The present work addresses the performance appraisal of an anaerobic filter used, on a real scale, to treat the effluents from a medium size dairy industry. Its main focus is on the analysis of the influence of the height of the packing material layer on the verified performance of each vertical compartment of the filter, as well as the comparative of costs of implantation and operation with the system of activated sludge. The flow diagram of the treatment system incorporates units of static sieving, neutralization and equalization of flow rate and floatation, besides the anaerobic filter, aim of this study. The filter possesses a net total volume of 997 m<sup>3</sup> with the packing material (blast furnace slag) occupying a volume of 862 m<sup>3</sup>.

After 12 months of continuous monitoring, it was verified that the concentrations and removal efficiencies of filtered COD did not substantially change from the packing material height of 0.60 m, corresponding to the following operational parameters of the anaerobic filter: HRT = 76h and OLR= 0.63kg COD/m<sup>3</sup>. The concentrations of volatile VFAs inside the filter were very low during the whole operational period, indicating their rapid conversion into methane gas. In all, the treatment system showed a good performance, as the overall efficiency of COD removal very satisfactorily met the in current legislation in the State of Minas Gerais.

**KEY WORDS:** Anaerobic filter, industries effluents, dairy effluents, effluents treatment.

# 1 INTRODUÇÃO

A produção mundial de leite, de acordo com o Banco de Dados da FAO - *Food and Agricultural Organization* (órgão da ONU), permanece atualmente acima de 420 bilhões de litros ao ano. Essa produção tem tido uma evolução muito lenta (1% a 2% ao ano) e não acompanha o comportamento dos outros produtos agropecuários produzidos mundialmente, cujo crescimento é maior. Esse quadro está relacionado à limitação geográfica, aos recursos naturais, ao desenvolvimento tecnológico (genética e tecnologia de produção), além de sofrer influências e tendências políticas e econômicas.

No Brasil, a partir do início do ano de 1990, diversas ações governamentais foram praticadas para a abertura da economia brasileira ao mercado internacional do leite. A principal consequência dessa iniciativa foi a busca pelo aumento da produtividade e da melhoria da qualidade, de modo a tornar o produto brasileiro competitivo em relação aos outros países (SEBRAE-MG, 1997).

A cadeia agroindustrial de leite no Brasil é uma das mais importantes, tanto pela questão econômica quanto pela social. A pecuária de leite está presente em todos os Estados da Federação, empregando mão-de-obra, gerando excedentes comercializáveis e garantindo renda para boa parte da população brasileira. O segmento da indústria nacional é amplo e diversificado e nele estão presentes empresas de laticínios de vários portes, desde pequenas fábricas – captando reduzido volume de leite – até as multinacionais e as cooperativas centrais, que processam centenas de milhares de litros de leite por dia. A cadeia ainda movimenta e impulsiona parte da produção nacional de grãos e outros insumos necessários nas várias etapas da produção e industrialização. Ressaltam-se, ainda, os efeitos sobre o setor de distribuição e comercialização de alimentos e a importância nutricional desses produtos (SEBRAE-MG, 1997).

Diante dessas características do setor, surgem também problemas ligados, principalmente, ao controle ambiental, pois as indústrias de laticínios produzem razoável quantidade de efluentes líquidos e com elevada concentração de matéria orgânica. O Estado de Minas Gerais, por exemplo, possui cerca de 1250 indústrias de laticínios formalmente constituídas, sem qualquer tipo de tratamento de seus efluentes líquidos, lançando-os diretamente nos corpos receptores. Esse dado permite concluir que a poluição provocada pelos efluentes líquidos de laticínios assume proporções que exigem uma conscientização dos proprietários e dos trabalhadores das

indústrias e a prática de ações concretas para minimizar esse impacto ambiental (MACHADO et al, 2002).

Várias alternativas foram consagradas no decorrer dos anos para o tratamento dos efluentes gerados pelos laticínios, dentre elas os sistemas aeróbios, sobretudo os de lodos ativados. Já nos processos de tratamentos anaeróbios, o que se observa é sua não recomendação como forma única de tratamento, uma vez que estes têm capacidade de redução de concentrações de matéria orgânica entre 60 e 80%, considerando-se os baixos tempos de detenção (von SPERLING, 1996), o que não atende à legislação ambiental vigente no Estado de Minas Gerais.

A busca incessante por novas tecnologias fez com que em 1963, através de um acordo básico entre Brasil e Alemanha, fossem fixadas as bases para um acordo de cooperação técnica entre os dois países. Os projetos aprovados pelo Ministério de Cooperação Econômica e Desenvolvimento Alemão (BMZ) são executados pela Cooperação Técnica Alemã – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), em parceria com diversas instituições brasileiras, dentre elas: DESA-UFMG, CDTN, CETEC, FAPEMIG, FEAM, FIEMG, OCEMG, SEBRAE (MACHADO et al, 2002).

Com o objetivo de propor soluções tecnológicas para a redução do impacto ambiental das indústrias de laticínios de médio e pequeno porte, em 1993, foi aprovado pelo BMZ o Projeto Minas Ambiente, subprojeto 3, cuja coordenação ficou a cargo do DESA – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Basicamente, o Projeto Minas Ambiente – subprojeto 3 propôs para o tratamento de efluentes de laticínios as seguintes etapas: tratamento preliminar, tanque de equalização, filtro anaeróbio seguido de i) biofiltro aerado submerso, ii) filtro biológico percolador ou iii) disposição no solo, sendo que as pesquisas realizadas em uma estação experimental ocorreram no período de setembro de 2001 a agosto de 2002, gerando um relatório final em setembro de 2002 (MACHADO et al, 2002).

O presente trabalho constitui-se de um estudo de caso, onde foram avaliados parâmetros de operação de um filtro anaeróbio, em escala real, instalado em uma indústria de laticínios de médio porte, localizada na cidade de Sete Lagoas – Minas Gerais e comparados aos

parâmetros aplicados nas pesquisas no âmbito do Projeto Minas Ambiente e literaturas técnicas especializadas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar técnica e economicamente o desempenho de um filtro anaeróbio implantado em uma indústria de laticínios quanto à remoção das cargas orgânicas afluentes, associando os parâmetros de projeto ao desempenho do filtro e comparando-os aos parâmetros de projetos sugeridos pelo *Projeto Minas Ambiente* e literatura especializada.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o desempenho global do sistema e o atendimento aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental;
- Avaliar o desempenho do filtro anaeróbio em relação ao perfil de decaimento das concentrações de DQO e AGV ao longo do filtro (altura do meio suporte);
- Avaliar os custos de implantação e operação do filtro anaeróbio e compará-lo ao sistema de lodos ativados convencional.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 *Caracterização da poluição gerada pelas indústrias de laticínios*

Os efluentes líquidos da indústria de laticínios são despejos originários de diversas atividades desenvolvidas na indústria, que contêm leite e produtos do leite, detergentes, desinfetantes, areia, lubrificantes, açúcar, pedaços de frutas, essências e condimentos diversos que são diluídos nas águas de lavagem de equipamentos, tubulações, pisos e demais instalações da indústria.

Os efluentes líquidos são considerados como os principais responsáveis pela poluição causada pelas indústrias de laticínios e dentre eles se destaca o soro<sup>1</sup> gerado no processo de fabricação de queijos. Cabe ressaltar que o soro pode ser aproveitado como matéria-prima para a fabricação de produtos lácteos, porém, quando não aproveitado, o soro é descartado como efluente industrial em um curso de água, provocando efeito poluidor devido à sua alta concentração de matéria orgânica (varia de 30.000 a 60.000 mg. L<sup>-1</sup>) (MACHADO et al, 2002).

O potencial poluidor do soro é aproximadamente cem vezes maior que o do esgoto doméstico. Atualmente, considera-se incorreto descartar o soro direta ou indiretamente, nos cursos de água, o que é adotado pela maioria das indústrias brasileiras (RALPH, 1982, citado por TORRES, 1988).

O Tabela 3.1 a seguir apresenta as principais fontes geradoras de efluentes nas indústrias de laticínios.

---

<sup>1</sup> Soro é a parte líquida do leite resultante da produção de queijos.

**Tabela 3.1 – Principais fontes geradoras de efluentes líquidos em laticínios**

<b>Operação ou processo</b>	<b>Descrição</b>
Lavagem e limpeza	<ul style="list-style-type: none"><li>● Enxaguamento para a remoção de resíduos de leite ou de seus componentes, assim como de outras impurezas que ficam aderidos em latões de leite, tanques diversos (inclusive tanques de caminhões de coleta e silos de armazenagem de leite), tubulações de leite e mangueiras de soro, bombas, equipamentos e utensílios diversos utilizados diretamente na produção;</li><li>● Lavagem de pisos e paredes;</li><li>● Arraste de lubrificantes de equipamentos da linha de produção, durante as operações de limpeza.</li></ul>
Descartes e descargas	<ul style="list-style-type: none"><li>● Descargas de misturas de sólidos de leite e água por ocasião do início e interrupção de funcionamento de pasteurizadores, trocadores de calor, separadores e evaporadores;</li><li>● Descarte de soro, leite<sup>2</sup> e leite ácido nas tabulações de águas residuárias;</li><li>● Descarte de finos oriundos da fabricação de queijos;</li><li>● Descarga de produtos e materiais de embalagens perdidos na operação de empacotamento, inclusive aqueles gerados em colapsos de equipamentos e na quebra de embalagens;</li><li>● Produtos retornados à indústria.</li></ul>
Vazamentos e derramamentos	<ul style="list-style-type: none"><li>● Vazamentos de leite em tubulações e equipamentos correlatos devido a:<ul style="list-style-type: none"><li>- Operação e manutenção inadequadas de equipamentos;</li><li>- Transbordamentos de tanques, equipamentos e utensílios diversos;</li><li>- Negligência na execução de operações o que pode causar derramamentos de líquidos e de sólidos diversos em locais de fácil acesso às tubulações de esgotamento de águas residuárias.</li></ul></li></ul>

Fonte: Machado et al, 2002.

Os despejos descritos a seguir podem aumentar significativamente os efluentes líquidos de uma indústria de laticínios, tanto em termos de vazão como de carga poluidora, mas, a rigor, em uma indústria bem gerenciada, não deveriam ser encaminhados às tubulações de águas residuárias (MARSHALL E HARPER, 1984):

- Águas da lavagem dos caminhões, incluindo, sobretudo areia, barro e folhas de árvores;
- Pó de carvão e lascas de lenha, usados como combustível;
- Derramamento de óleo combustível;
- Cinzas de caldeira;
- Água e produtos químicos usados nas caldeiras ou em equipamentos de refrigeração.

<sup>2</sup> Leiteiro é a parte líquida resultante da fabricação de manteiga.

### 3.1.1 Natureza dos efluentes líquidos

Os efluentes líquidos das indústrias de laticínios abrangem os efluentes líquidos industriais, os esgotos sanitários gerados e as águas pluviais captadas e contaminadas na respectiva indústria. São constituídos pelos despejos líquidos originários de diversas atividades desenvolvidas na indústria, contendo as seguintes matérias principais diluídas nas águas de lavagem de equipamentos, tubulações, pisos e demais instalações da indústria (MACHADO et al, 2002):

- leite e derivados recebidos como matéria-prima;
- matérias lácteas produzidas e não aproveitadas ao longo dos processos industriais, geralmente gordura, podendo incluir, ainda, quando não removidas para a reciclagem ou para a disposição em separado, sólidos de leite retidos em dispositivos como clarificadores, filtros e grelhas, bem como restos ou pedaços de produtos finais;
- detergentes e desinfetantes usados nas operações de lavagem e sanitização;
- areia e poeira removidas nas operações de lavagens de pisos e latões de leite;
- lubrificantes empregados na manutenção de equipamentos.

Na fabricação de produtos mais elaborados, como o queijo, o requeijão, o iogurte e a bebida láctea, os efluentes líquidos industriais poderão conter ainda (MACHADO et al, 2002):

- açúcar e pedaços de frutas (usados em iogurte), açúcar e essências (fabricação de iogurtes e bebidas lácteas) ou condimentos diversos (produção de queijos condimentados);
- subprodutos como o soro (fabricação de queijo) e o leitelho (fabricação de manteiga), mesmo quando aproveitados, irão aparecer em quantidades que podem ser residuais (dependendo dos cuidados tomados) e que tem por origem as operações de esgotamento total dos tanques ou de mangueiras e/ou as operações de limpeza.

O soro, o leitelho e o leite ácido, pelos seus valores nutritivos e pelas suas elevadas cargas orgânicas, não devem ser misturados aos demais efluentes da indústria. Ao contrário, devem ser captados e conduzidos separadamente, de modo a viabilizar o seu aproveitamento na fabricação de outros produtos lácteos ou para a utilização direta, com ou sem beneficiamento industrial, na alimentação animal (MACHADO et al, 2002).

As indústrias de laticínios têm, ainda, como efluente líquido, o esgoto sanitário dos banheiros, vasos sanitários, lavatórios, refeitórios e cozinhas e de águas pluviais contaminadas nos limites do terreno onde a indústria se localiza. Geralmente, esses dois tipos de efluentes possuem tubulações independentes, sendo que as de águas pluviais não contaminadas, em hipótese alguma, devem ser conectadas às demais tubulações de efluentes. As tubulações de esgotos sanitários e a tubulação de águas residuárias devem ser separadas até o tratamento primário (quando existir), pois as mesmas têm dispositivos diferentes de tratamento.

As águas de refrigeração e as águas de caldeiras não são geralmente consideradas como águas residuárias ou efluentes líquidos nas indústrias de laticínios, uma vez que são usadas em sistemas de recirculação. Apenas nos pequenos laticínios que utilizam o pasteurizador de cascata, é que muitas vezes não se faz a recirculação da água de resfriamento, embora essa recirculação seja possível e recomendável. Nesses casos não é adicionado à água nenhum produto químico especial e esse tipo de efluente pode ser descartado diretamente nos corpos d'água receptores.

### **3.1.2 Características físico-químicas dos efluentes líquidos de laticínios**

Embora os efluentes líquidos decorrentes dos vários processos empregados pela indústria de laticínios tenham uma natureza geralmente similar entre si, refletindo o efeito das perdas de leite e seus derivados, a sua composição detalhada é influenciada pelos seguintes fatores (MACHADO et al, 2002):

- processos industriais em curso;
- volume de leite processado;
- condições e tipos de equipamentos utilizados;
- práticas de redução da carga poluidora e do volume de efluentes;
- atitudes de gerenciamento e da direção da indústria em relação às práticas de gestão ambiental;
- quantidade de água utilizada nas operações de limpeza e no sistema de refrigeração.

A Tabela 3.2 apresenta valores médios das principais características físico-químicas dos efluentes industriais de fábricas de laticínios publicados pela EPA (1971) e Kearney (1973), citados por Marshall e Harper (1984).

**Tabela 3.2 – Características físico-químicas de efluentes industriais de fábricas de laticínios nos EUA e na Nova Zelândia.**

Características	EUA		Nova Zelândia
	Intervalo	Média	Intervalo
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	40 – 48.000	2.300	90 – 12.400
DQO (ml/L)	80 – 95.000	4.500	180 – 23.000
Sólidos suspensos totais SST (mg/L)	24 – 4500	820	7 – 7.200
Sólidos totais ST (mg/L)	235 – 8.500	2.500	0 – 2.100
Gordura (mg/L)	35 – 500	209	-
Nitrogênio (mg/L)	1 – 180	64	1 – 70
Carboidrato (mg/L)	250 – 930	520	-
Cálcio (mg/L)	55 – 115	37	-
Sódio (mg/L)	60 – 810	320	-
Potássio (mg/L)	10 – 160	70	-
Fósforo (como PO <sub>4</sub> ) (mg/L)	9 – 210	48	4 – 150
Cloreto (mg/L)	48 – 1.930	480	-
pH	4,0 – 9,4	7,2	3,0 – 13,2
Temperatura (°C)	18 – 55	35	11 – 72
Carga específica de DBO <sub>5</sub> (kg de DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> de leite)	0,2 – 7,1	5,8	0,2 - 28

Fontes: EPA (1971) e Kearney (1973). Nova Zelândia: New Zealand Dairy Research Institute, período de 1972-80, citados por Marshall e Harper (1984).

As faixas de variação apresentadas na Tabela 3.2 são muito amplas, e deve-se observar que os valores mais elevados correspondem às situações em que há o cuidado em minimizar o despejo nas tubulações de volumes significativos de leite, soro, leiteiro e sólidos.

Na Tabela 3.3 são apresentados valores característicos de efluentes obtidos pela CETESB (1990).

**Tabela 3.3 – Características físico-químicas médias de efluentes líquidos industriais de diferentes tipos de indústrias de laticínios.**

Parâmetros	Tipos de indústria (ver legenda abaixo)						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	1.033	487	1.319	3.420	290	875	761
DQO (ml/L)	1.397	873	1.740	4.430	2.010	1.365	1.370
Sólidos não filtráveis totais SST (mg/L)	520	329	494	420	915	776	471
Sólidos totais ST (mg/L)	-	-	993	3.300	-	1.870	1.406
Sólidos sedimentáveis (mg/L)	-	-	14	1	1,5	0,1	1,7
Nitrogênio total (mg/L)	-	26,5	43,2	86,2	56,7	25,5	11,3
Fósforo total (mg/L)	5,75	4,5	5,9	14,2	18,8	6,8	8,8
Óleos e graxas (mg/L)	562	-	253	575	-	100	-
Temperatura (°C)	-	-	29	31	29	38	28
Vazão (m <sup>3</sup> /t de leite processado)	1,06	1,47	0,83	4,1	5,5	3,2	5,4
Carga orgânica de DBO <sub>5</sub> (kg de DBO <sub>5</sub> /t de leite)	1,09	0,72	1,09	14,02	1,6	2,80	4,11
Leite processado (t)	18,5	29,4	48,4	226,2	59,7	80,0	63,4

Tipos de indústria:

- |   |                                  |
|---|----------------------------------|
| (1) Posto de recepção e resfriamento de leite | (4) Leite esterilizado e iogurte |
| (2) Leite pasteurizado e manteiga             | (5) Leite condensado             |
| (3) Leite pasteurizado e iogurte              | (6) Leite em pó                  |

Fonte: adaptado de CETESB (1990)

A DBO<sub>5</sub> é o parâmetro padrão usado para avaliar o potencial de poluição de efluentes líquidos onde a matéria orgânica biodegradável é predominante, a exemplo do que ocorre no caso das indústrias de laticínios. É também um parâmetro fundamental para o projeto de instalações de tratamento desse tipo de efluente.

Na literatura relativa à indústria de laticínios, a DBO<sub>5</sub> costuma ser medida em termos de kg de DBO<sub>5</sub> por m<sup>3</sup> (ou tonelada) de leite processado, forma de expressão esta que é designada pela carga específica de DBO<sub>5</sub> e que apresenta a grande vantagem de fornecer a DBO<sub>5</sub> relacionada ao volume de leite processado, o que é mais facilmente quantificável, além de não depender do volume do efluente líquido, que varia muito de indústria para indústria. A Tabela 3.4 apresenta valores desse parâmetro para diversos tipos de indústrias de laticínios, segundo várias fontes de consulta ali indicadas (MACHADO et al, 2002).

**Tabela 3.4** – Valores da carga específica de DBO<sub>5</sub> para efluentes líquidos industriais de diferentes tipos de indústrias de laticínios.

Tipo de indústria	Carga específica de DBO <sub>5</sub> (kg de DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> de leite processado)		DBO <sub>5</sub> (mg/L)
	Variação	Média	
Laticínios em geral	0,20 – 28,00 <sup>(1)</sup>	-	Ver Tab. 3.3
	0,20 – 7,10 <sup>(2)</sup>	5,80 <sup>(2)</sup>	Ver Tab. 3.3
Posto de recepção e refrigeração de leite	0,30 – 0,70 <sup>(3)</sup>	0,46 <sup>(3)</sup>	1.033 <sup>(4)</sup>
	-	1,10 <sup>(4)</sup>	700 <sup>(5)</sup>
	0,37 – 0,42 <sup>(5)</sup>	0,39 <sup>(5)</sup>	1.000 <sup>(5)</sup>
	1,25 – 1,50 <sup>(5)</sup>	1,38 <sup>(5)</sup>	-
Leite pasteurizado e manteiga	0,43 – 0,87 <sup>(4)</sup>	-	487 – 1.319 <sup>(4)</sup>
	-	0,81 <sup>(5)</sup>	403
	-	0,87 <sup>(6)</sup>	-
Queijaria (com reutilização variável do soro)	-	4,10 <sup>(6)</sup>	3.037 <sup>(6)</sup>
	-	4,84 <sup>(5)</sup>	1.180 – 1.334 <sup>(5)</sup>
	-	5,40 <sup>(5)</sup>	1.350 <sup>(5)</sup>
	-	18,90 <sup>(5)</sup>	5.050 <sup>(5)</sup>
Leite pasteurizado e iogurte	-	14,24 <sup>(4)</sup>	3.420 <sup>(4)</sup>
Leite esterilizado e iogurte	-	0,84 <sup>(4)</sup>	290 <sup>(4)</sup>

Referências: (1) Dados do New Zealand Dairy Research Institute, conforme Marshall e Harper (1984). (2) EPA (1971), citado por Marshall e Harper (1984). (3) Dados do relatório da EPA 440/1-74-021, conforme CETESB (1990). (4) CETESB (1990), dados de levantamento de campo feito pela CETESB em São Paulo. (5) MINAS AMBIENTE/CETEC (1998). (6) EPA (1971), citado por CETESB (1990).

A Tabela 3.5 apresenta valores da carga específica de DBO para várias operações de indústrias de laticínios segundo a International Dairy Federation (1978), citada por Marshall e Harper (1984). Esses dados incluem sugestões de metas que podem ser alcançadas por meio de esforços razoáveis, segundo o autor. É importante observar que os valores medidos não

incluem contribuições significativas de derramamentos, vazamentos ou despejos de soro, de leite e de leite ácido.

**Tabela 3.5** – Valores da carga específica de  $DBO_5$  para efluentes líquidos industriais de várias operações de indústrias de laticínios, inclusive metas que podem ser atingidas por esforços razoáveis.

Operação	Carga específica de $DBO_5$ (kg de $DBO_5/m^3$ de leite processado)		
	Média	Varição	Meta
Recepção de leite, lavagem de latões e limpeza	0,26	0,11 – 0,66	0,11
Refrigeração de leite bruto, estocagem e lavagem de tanques e tubulações	0,19	0,07 – 0,31	0,07
Lavagem de caminhões e tanques	0,25	0,09 – 0,24	0,10
Separação e estocagem de leite desnatado e manteiga mais pasteurização de creme	0,66	0,46 – 1,20	0,30
Desnate e lavagem de manteiga	0,46	0,25 – 0,30	0,30
Evaporação do leite desnatado para sólidos totais baixos	0,23	0,16 – 0,30	0,16
Evaporação do leite desnatado para sólidos totais altos e secagem em spray	0,74	0,14 – 1,50	0,30
Secagem em cilindros (roller drying)	0,53	0,25 – 1,30	0,30
Pasteurização de leite e estocagem	0,29	0,10 – 0,50	0,10
Engarraamento de leite pasteurizado	0,11	–	0,10
Lavagem de garrafas de leite	0,23	0,05 – 0,37	0,15
Pasteurização de leite e estocagem, engarraamento de leite pasteurizado, lavagem de garrafas de leite	0,85	0,49 – 1,70	0,35
Grumo de creme (clotted cream)	1,20	–	0,60
Pasteurização e empacotamento de creme	0,79	–	0,40
Fabricação de queijo (com prensagem)	0,89	0,23 – 2,00	0,50
Fabricação de queijo Cottage (com lavagem da coalhada)	15,00	–	2,00
Condensado do soro fresco para sólidos totais baixos	0,25	–	0,25
Condensação para obtenção de leite condensado	1,40	1,20 – 1,70	0,60
Evaporação de todo o creme, com enlatamento	0,75	0,50 – 1,00	0,50

Fonte: International Dairy Federation/IDF (1978), citado por Marshall e Happer (1984).

Na Tabela 3.6 apresentam-se valores da relação  $DBO_5/DQO$  e da relação  $COT^3/DQO$  para diversos produtos lácteos e para alguns tipos de efluentes de indústrias de laticínios, com base em determinações feitas pelo New Zealand Dairy Research Institute, cuja pesquisa embasa os seguintes comentários (MACHADO et al, 2002):

- os efluentes líquidos brutos (não tratados) de laticínios apresentam valores de  $DBO_5/DQO$  na faixa de 0,50 a 0,70. Quanto maior esse valor, maior é a fração biodegradável dos efluentes e tanto mais indicado é o seu tratamento por processos biológicos;

<sup>3</sup> Carbono orgânico total.

- valores da relação  $DBO_5/DQO$  fora da faixa de 0,50 a 0,70 são indicadores de efluentes de natureza incomum, como aqueles contaminados por amônia ou glicol originários das instalações de água fria, ou por substâncias tóxicas ao teste de  $DBO_5$ ;
- para o parâmetro COT ainda existem poucos valores registrados no que se refere à indústria de laticínios, sendo que os publicados pela IDF(1981) variam de 0,30 a 0,90.

**Tabela 3.6** – Valores das relações  $DBO_5/DQO$  e  $COT/DQO$ , para alguns produtos.

Produto/efluente líquido	$DBO_5/DQO$	$COT/DQO$
<b>Produtos:</b>		
Leite integral	0,69	-
Leite desnatado	0,63	0,34
Leitelho (soro de manteiga)	0,66	-
Soro	0,52	-
Caseína	0,46 <sup>(a)</sup>	0,38
Lactose	0,53 <sup>(a)</sup>	0,40
Proteína do soro	0,23	-
Gordura de leite	0,79 <sup>(a)</sup>	-
Soro de caseína	-	0,76
<b>Efluentes líquidos de indústria de:</b>		
Manteiga e pó de manteiga	0,52 – 1,13	0,24 – 0,35
Caseína láctea	0,53 – 1,13	-
Queijo cheddar	0,33 – 0,78	-
Leite em pó	-	0,21 – 0,45
Multiprodutos de laticínios	-	0,25 – 0,45

Fonte: (a) – EPA (1971); Marshall e Harper (1984).

No que se refere à influência de detergentes, sanitizantes e lubrificantes nos efluentes líquidos das indústrias de laticínios, após uma série de levantamentos e determinações feitos nos EUA, chegou-se à conclusão de que componentes desses produtos estão presentes geralmente em concentrações baixas para causarem efeitos tóxicos nas estações de tratamento de efluentes, (EPA, 1971).

Não obstante, há o consenso de que tais produtos devem ser usados dentro do estritamente necessário, visto que a sua utilização em excesso implica em desperdício financeiro e pode constituir-se em risco ao tratamento de efluentes, a depender das quantidades em excesso aplicadas. Destacam-se ainda as seguintes informações de interesse, principalmente para as considerações sobre a redução de efluentes (MARSHALL e HARPER, 1984):

- agentes hidrofílicos e surfactantes apresentam valores de  $DBO_5$  na faixa de 0,05 a 1,2 kg de  $DBO_5$  por kg de produto;
- os ácidos usados em detergentes aplicados em indústrias de laticínios possuem valores de  $DBO_5$  na faixa de 0,25 a 0,85 kg de  $DBO_5$  por kg de produto;

- pelas suas características, detergentes e sanitizantes podem contribuir significativamente, dependendo das quantidades aplicadas, para os teores de DBO<sub>5</sub>, de DQO recalcitrante e de fosfato em efluentes líquidos.

A Tabela 3.7 apresenta algumas características físico-químicas de produtos lácteos fluidos.

**Tabela 3.7** – Demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>) e demanda química de oxigênio (DQO) de alguns produtos lácteos fluidos.

Produto	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DQO (mg/L)
Leite 2%	100.000 <sup>(*)</sup>	-
Leite desnatado	67.000	100.000
Leite integral	104.000	210.000
Creme para café	206.000	-
Creme	399.000	860.000
Leite com chocolate	145.000 <sup>(*)</sup>	-
Manteiga desnatada	68.000	110.000
Manteiga cultivada	64.000 <sup>(*)</sup>	-
Creme de soro	218.000 <sup>(*)</sup>	-
logurte	91.000 <sup>(*)</sup>	-
Leite concentrado	208.000	-
Sorvete	292.000	-
Soro doce	34.000	75.000
Soro de queijo Cottage	31.500	-

<sup>(\*)</sup> calculado pelos valores dos componentes

Fontes: valores DBO<sub>5</sub>, EPA (1971); valores de DQO, IDF (1981); ambos citados por Marshal e Harper (1984).

### 3.1.3 Vazão dos efluentes líquidos em indústrias de laticínios

A vazão dos efluentes líquidos de uma indústria de laticínio é extremamente variável ao longo do dia, dependendo das operações de processamento ou de limpeza que estejam em curso na indústria. Há também as flutuações sazonais devido às modificações introduzidas no perfil qualitativo e/ou quantitativo de produção.

A vazão diária (m<sup>3</sup>/dia) dos efluentes líquidos das indústrias de laticínios costuma ser avaliada por meio do denominado coeficiente de volume de efluente líquido, expresso em termos de volume de efluente líquido gerado, dividido pelo volume de leite recebido. Esse é um coeficiente bastante prático, que permite uma rápida estimativa da vazão do efluente líquido, uma vez conhecido o volume de leite recebido pela indústria de laticínios. (MACHADO et al, 2002).

A Tabela 3.8 apresenta alguns valores do coeficiente de volume de efluente líquido em indústrias de laticínios, segundo as diversas fontes de informações ali indicadas.

**Tabela 3.8 – Valores do coeficiente de volume de efluentes líquidos em indústrias de laticínios**

Tipo de indústria	Volume de efluente líquido (litro/litro de leite recebido)	
	Variação	Média
Indústrias de laticínios em geral	0,70 – 4,40 <sup>(1)</sup>	–
	0,10 – 7,10 <sup>(2)</sup>	2,40 <sup>(2)</sup>
Posto de recepção e refrigeração de leite	0,31 – 1,86 <sup>(3)</sup>	0,82 <sup>(3)</sup>
	–	1,06 <sup>(4)</sup>
Leite pasteurizado e manteiga	0,83 – 1,47 <sup>(4)</sup>	–
	–	0,80 <sup>(5)</sup>
Queijaria	–	2,00 <sup>(6)</sup>
Leite pasteurizado e iogurte	–	4,10 <sup>(4)</sup>
Leite esterilizado e iogurte	–	2,90 <sup>(4)</sup>

Fonte: (1) Dados do New Zealand Dairy Research Institute, conforme Marshall e Harper (1984). (2) EPA (1971), citado por Marshall e Harper (1984). (3) Dados do relatório da EPA 440/1-74-021, conforme CETESB (1990). (4) CETESB (1990), dados de levantamento de campo feito pela CETESB em São Paulo. (5) EPA, citado por CETESB (1990). (6) MINAS AMBIENTE/CETEC (1998).

Segundo entendimento de Marshall e Harper (1984), os valores entre 0,5 e 2,0 litros de efluente por litro de leite podem ser atingidos pelas indústrias de laticínios dotadas de um adequado programa de prevenção e controle de perdas e de desperdícios.

A vazão dos efluentes líquidos das indústrias de laticínios está relacionada ao volume de água consumido pelo laticínio. Segundo Strydom et al (1997), o valor da relação entre a vazão de efluentes líquidos e a vazão de água consumida pelos laticínios costuma situar-se entre 0,75 e 0,95. Esse último valor, em que o coeficiente “efluente/água” é bem próximo a 1,0, justifica a tendência de muitos projetistas em igualar, por medida de segurança, o volume de efluente ao volume de água consumido. Por essa razão, o conhecimento do valor do consumo de água de uma dada indústria de laticínios, ou de outras indústrias semelhantes, pode ser de grande utilidade para a estimativa da correspondente vazão de efluentes líquidos.

A Tabela 3.9 mostra alguns dados referentes à variação e à média das taxas de consumo de água de indústrias de laticínios em Minas Gerais.

**Tabela 3.9** – Variação e média das taxas de consumo de água das indústrias de laticínios.

Laticínio	Agrupamento (L leite recebido/dia)	Quantidade de laticínios	Taxa de consumo de água (L água por L leite recebido)	
			Variação	Média
Laticínios de cooperativas	10.000 a 20.000	3	0,9 a 2,0	1,5
	> 20.000	25	0,4 a 7,1	2,3
Laticínios independentes	Até 10.000	12	1,4 a 5,6	2,9
	10.001 a 20.000	9	0,3 a 6,7	3,0
	> 20.000	6	1,5 a 5,1	3,5

Fonte: MINAS AMBIENTE/CETEC, 1998.

A Tabela 3.10 apresenta valores de taxas de consumo de água publicados pela International Dairy Federation – IDF (1981), relativos aos diversos países da Europa, Japão e Nova Zelândia.

**Tabela 3.10** – Taxas aproximadas de consumo de água (em L de água/Lde leite recebido) para a fabricação de vários produtos lácteos.

Produto	País								
	Áustria	Bélgica	Finlândia	Japão	Nova Zelândia	Noruega	Polônia	Alemanha	Reino Unido
Manteiga e leite em pó (spray)									
Valor típico:	2,5	2,1	1,7	3,8		4,6-7,0 (f)			2,0
Faixa:		0,7-7,2		1,7-8,6		0,9-3,0 (g)			0,9-2,7
Caseína (ácida)									
Valor típico:					2,5			0,8	
Faixa:					1,7-3,2				
Caseína, manteiga, leite em pó (spray)									
Valor típico:					2,5				
Faixa:					1,4-6,9				
Queijo									
Valor típico:	3,5	1,1 (b)	1,7		1,6	27-37	5,5 (c)	2,1	2,0
Faixa:	5,0 (a)	0,6-1,5			1,0-3,0		5,7 (c)	0,6-4,0	0,8-3,0
Leite engarrafado									
Valor típico:	1,5	3,9	3,4			0,4-0,9 (f)	6,0	2,8	2,0
Faixa:	1,8 (d)			3,1-3,7		1,0-1,9 (g)		0,9-4,2	1,0-4,0
Leite em pó (spray)									
Valor típico:					3,7		3,5 (c)	0,5 (e)	
Faixa:					2,9-5,5		1,5-5,0 (c)	0,3-0,8	

Legenda: (a) requeijão (b) com manteiga (c) inclui água fria (d) com manteiga, coágulos, creme e creme batido (e) inclui condensado de vapor (f) indústrias menores (g) indústrias maiores.

Fonte: International Dairy Federation (1981).

### **3.2 Redução e controle de efluentes líquidos**

A redução e o controle de efluentes líquidos incluem um conjunto de ações para reduzir o volume dos efluentes gerados e a carga poluidora, propiciando um tratamento mais fácil e uma redução, tanto na implantação quanto na operação das unidades de tratamento.

Segundo Machado et al (2002), há dois tipos de ações para a redução e o controle de efluentes líquidos: ações de gerenciamento e ações de engenharia de processo. As ações de gerenciamento são iniciativas que, normalmente, não implicam em custos adicionais significativos, a exemplo, a manutenção de rotina. Já as ações de engenharia de processo dizem respeito à aplicação de técnicas de engenharia voltadas aos processos industriais, que podem exigir investimentos maiores, por exemplo: automação e troca de equipamentos.

A Tabela 3.11 indica os itens nos quais podem ser aplicadas ações de gerenciamento e ações de engenharia na indústria de laticínios.

**Tabela 3.11 – Ações para controle de efluentes líquidos.**

<b>Item</b>	<b>Ação</b>
Processo	<ul style="list-style-type: none"><li>● Estudo do processo produtivo, incluindo a realização de balanços materiais para quantificar as perdas de produto e determinar os locais de sua ocorrência, de modo a identificar as mudanças cabíveis e as necessidades de manutenção dos equipamentos danificados;</li><li>● Racionalizar o número de partidas e paradas requeridas em operações geradoras de efluentes, tais como separação, pasteurização e evaporação;</li><li>● Otimizar a seqüência de processamento evitando limpezas desnecessárias entre os intervalos de produção, de modo a minimizar as operações de lavagem, geradoras de volumes significativos de efluentes líquidos;</li><li>● Elaborar e manter atualizado o cadastro de todas as tubulações de utilidades;</li><li>● Minimizar os picos de volume e de concentração de efluentes líquidos por meio do adequado escalonamento e execução das operações de limpeza;</li><li>● Aprimorar o controle de qualidade dos produtos fabricados, que é uma medida importante para: (1) reduzir a quantidade de produtos desenvolvidos, os quais têm de ser jogados fora ou dispostos de alguma maneira pela indústria; (2) redução das impurezas retidas em equipamentos como filtros e membranas, reduzindo assim os despejos associados à excessiva limpeza de tais equipamentos; (3) redução da freqüência de fabricação de reduzidos volumes de produtos, possibilitando assim processamentos mais eficientes e com menores descargas de efluentes líquidos por unidade de produto processado; (4) otimização do escalonamento da produção.</li></ul>
Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"><li>● Instalação de dispositivos controladores de nível em unidades passíveis de transbordamento acidentais como tanques, cubas, equipamentos e utensílios diversos;</li><li>● Instalação de recipientes para receber os líquidos oriundos da drenagem de tanques de armazenamento e da fabricação de queijo e outros produtos lácteos, desnatadeiras e outros equipamentos, como coletores de respingo. Esse material pode ser vendido ou doado a produtores de ração ou criadores de porcos ou ser aproveitado para a fabricação de produtos diversos;</li><li>● Instalação de coletores de respingo em equipamentos como máquinas de enchimento, para evitar a queda de matérias-primas e produtos no piso;</li><li>● Instalar válvulas de fechamento automático em todas as mangueiras de água, impedindo o escoamento desnecessário.</li></ul>
Treinamento	<ul style="list-style-type: none"><li>● Implantação de programas educacionais destinados ao pessoal que trabalha na produção, com a finalidade de desenvolver a conscientização da importância do uso racional dos recursos naturais e da proteção do meio ambiente;</li><li>● Treinamento do pessoal que trabalha na produção, voltado à correta operação e manutenção dos equipamentos e instalações diversas.</li></ul>
Rotinas operacionais	<ul style="list-style-type: none"><li>● Manter em boas condições de uso e de funcionamento os tanques, cubas e as tubulações, evitando-se perdas por vazamento;</li><li>● Implantar rotina para a verificação permanente das válvulas das máquinas de enchimento, para não haver sobras de produtos nas operações de embalagem;</li><li>● Operar os equipamentos com um nível de líquido suficientemente baixo, prevenindo perdas na ebulição;</li><li>● Implantar rotina para a verificação permanente das tubulações e acessórios do sistema CIP e de seus respectivos suportes. Essas tubulações devem ter fixação adequada para evitar vazamentos devidos às vibrações;</li><li>● Eliminar excessos de produção e o correspondente retorno de produtos devolvidos.</li></ul>

Fonte: adaptado de CETESB (1990) e Marshall e Harper (1984).

A Tabela 3.12 apresenta um exemplo do que se pode obter mediante a aplicação de ações de engenharia de processo em indústrias de laticínios. Observa-se que a redução da carga poluidora, bem como do volume de efluente industrial a ser tratado após a implantação de

ações mitigadoras, propicia ao empreendedor um menor investimento na implantação e operação da estação de tratamento de efluentes.

**Tabela 3.12** – Efeito de ações para a redução e controle de efluentes líquidos em indústrias de laticínios nos EUA

Operação/processo	Carga específica de DBO <sub>5</sub> (kgDBO <sub>5</sub> /1000kg de leite)		Volume de efluente (litro/litro de leite)	
	Antes das ações	Após as ações	Antes das ações	Após as ações
Caminhão tanque	0,20	0,06	0,060	0,045
Separação	0,08	0,01	0,008	0,007
Tanques de estocagem	0,20	0,05	0,076	0,038
Pasteurizador	0,80	0,15	0,606	0,151
Pasteurizador tanque de estocagem do leite pasteurizado	0,20	-	0,076	0,038
Máquinas de enchimento	0,30	0,07	0,038	0,023
Transporte	0,10	0,10	0,004	0,004
Estocagem	0,10	-	0,008	0,008
Distribuição/retorno do produto	0,40	-	0,045	0
Total	2,38	0,17	0,921	0,314

Ações adotadas: instalação de bandejas coletora de respingos em todas as máquinas de enchimento; sistema central de aquecimento de água com válvulas de parada em todas as mangueiras; reutilização dos rejeitos associados às operações de partida, parada e mudanças de equipamentos; air blow down de tubulações; coleta em separado dos resíduos retidos em separadores do sistema CIP, para disposição como resíduo sólido; planejamento da produção para eliminar devolução do produto.

Fonte: EPA (1974).

Destacam-se ainda como fundamentais para que um programa de redução e controle de efluentes líquidos seja bem sucedido, os seguintes requisitos (MARSHALL e HARPER, 1984):

- comprometimento formal da alta administração da indústria com o programa;
- criação de uma equipe de controle de perdas, incluindo nela membros das áreas de manutenção e operação de cada departamento e turno de trabalho;
- instalação de equipamentos apropriados para monitorar as perdas de produtos;
- estabelecimento de um sistema de compatibilidade financeira para avaliar os custos de perdas de recursos, o capital gasto com as medidas de controle e o retorno do capital investido;
- emprego de inovações para avaliar as áreas de maiores perdas e as ações de engenharia que poderiam ser empregadas para a redução dessas perdas;
- estabelecimento de um programa permanente de educação de gerentes, supervisores e operadores para desenvolver o entendimento da necessidade do controle de resíduos, dos benefícios econômicos decorrentes disso e dos fatores envolvidos no controle da água e dos efluentes;

- estabelecimento de metas a serem alcançadas pelo programa de controle;
- estabelecimento de um plano de monitoramento contínuo de perdas e do uso de recursos, com o retorno de resultados aos operadores;
- atenção diária tanto para as ações preventivas de manutenção como para as boas práticas de processos.

### **3.3 Tratamento de efluentes líquidos**

Os efluentes de indústrias de laticínios respondem muito bem ao tratamento biológico, já que a composição desse efluente é rica em compostos orgânicos, facilmente biodegradáveis e não apresentam, em geral, excesso de nutrientes. (MACHADO et al, 2002).

Na concepção de um sistema de tratamento de efluentes líquidos o objetivo e o nível do tratamento, assim como os estudos de impacto ambiental no corpo receptor, devem ser bem caracterizados. (von SPERLING, 1995).

De maneira geral, o tratamento de efluentes, seja para indústrias de laticínios, esgotos domésticos, ou outras tipologias industriais, é classificado de acordo com os seguintes níveis:

- preliminar;
- primário;
- secundário;
- terciário.

No tratamento preliminar, são removidos sólidos grosseiros, enquanto que o tratamento primário tem como objetivo a remoção de sólidos sedimentáveis e sólidos em suspensão. No tratamento secundário ocorre predominantemente a remoção de matéria orgânica e, ocasionalmente, nutrientes (nitrogênio e fósforo).

Nos primeiros níveis predominam mecanismos físicos, enquanto que no tratamento secundário predominam mecanismos biológicos. O tratamento terciário objetiva a remoção de poluentes específicos ou, ainda, a remoção de poluentes que não foram suficientemente removidos no tratamento secundário.

A Tabela 3.13 detalha os níveis de tratamentos.

**Tabela 3.13 – Níveis de tratamento de efluentes**

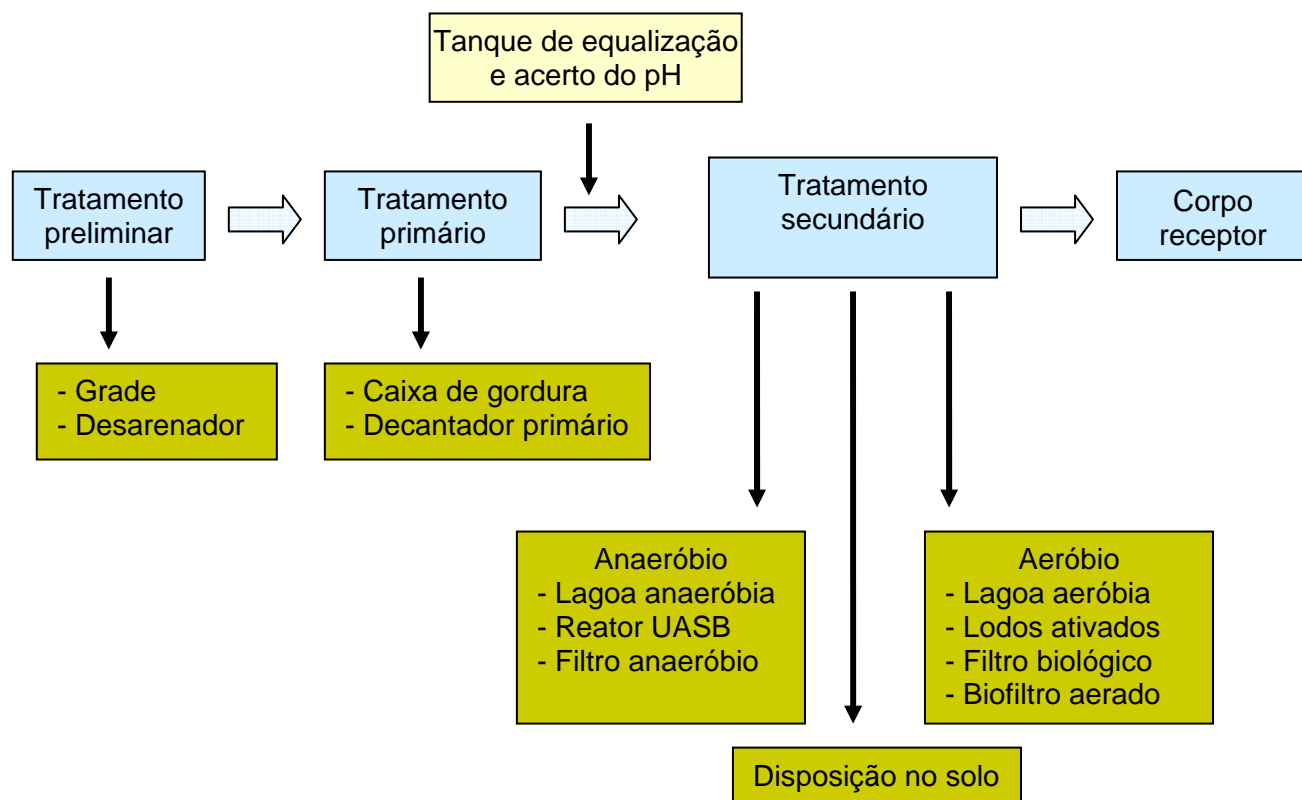
Nível	Remoção	
Preliminar	Sólidos em suspensão grosseiros (materiais de maiores dimensões e areia).	
Primário	Sólidos em suspensão sedimentáveis; DBO em suspensão (matéria orgânica componente dos sólidos em suspensão sedimentáveis).	
Secundário	DBO em suspensão (matéria orgânica em suspensão fina, não removida no tratamento primário); DBO solúvel (matéria orgânica na forma de sólidos dissolvidos).	
Terciário	Nutrientes (fósforo e nitrogênio); Patogênicos; Compostos não biodegradáveis;	Metais pesados; Sólidos inorgânicos dissolvidos; Sólidos em susp. Remanescente.

Fonte: von Sperling (1995).

O nível terciário de tratamento, apesar de sua importância, ainda é raro nas indústrias de laticínios, principalmente no Brasil.

Os sistemas de tratamento de efluentes líquidos na indústria de laticínios geralmente seguem as seqüências básicas de: tratamento preliminar, primário e secundário. Há, ainda, uma etapa paralela, que é o tratamento e a disposição final do lodo biológico. (MACHADO et al, 2002).

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma geral de um sistema típico de tratamento de efluentes líquidos para indústria de laticínios.



**Figura 3.1 – Fluxograma geral de um sistema de tratamento de efluentes.**

### 3.3.1 Tecnologias utilizadas para o tratamento de efluentes líquidos em laticínios

#### 3.3.1.1 Processos aeróbios

Os sistemas de lodos ativados são amplamente utilizados no tratamento de esgotos domésticos e industriais, sendo de grande aceitação e tradição no tratamento de efluentes de indústrias de laticínios, (MACHADO et al 2002).

Pela definição de Jordão e Pessoa (1995), o lodo ativado é o floco produzido num esgoto bruto ou decantado pelo crescimento de bactérias zoogléias ou organismos, na presença de oxigênio dissolvido e acumulado em concentração suficiente graças ao retorno de outros flocos previamente formados no tanque de decantação.

Nos tanques de aeração, o efluente e o lodo ativado são misturados, agitados e aerados. Nos decantadores secundários, o lodo é separado e adensado fisicamente do efluente tratado. Parte do lodo retorna ao tanque de aeração como reciclo e o excesso de lodo é retirado do sistema e tratado devidamente. O tempo de retenção de sólidos no reator é denominado *idade do lodo*. O líquido, apesar da recirculação (a qual é interna ao sistema) não sofre variação quantitativa, a menos da retirada da vazão de lodo excedente, que pode ser considerada desprezível. (von SPERLING, 1997). Este tempo de residência da fase líquida é também conhecido como tempo de detenção hidráulica.

Segundo von Sperling (1997), existem diversas variações do sistema de lodos ativados, notadamente quanto à:

#### Idade do lodo

- sistema de lodos ativados convencional;
- sistema de lodos ativados por aeração prolongada.

#### Fluxo

- contínuo;
- intermitente (batelada).

De maneira geral, as principais vantagens e limitações do sistema de lodos ativados são apresentadas na Tabela 3.14.

**Tabela 3.14** – Comparativo das principais vantagens e limitações do sistema de lodos ativados.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"><li>● Elevada eficiência;</li><li>● Baixos requisitos de área;</li><li>● Flexibilidade operacional;</li><li>● Boa resistência a cargas de choque;</li><li>● Menor possibilidade de insetos e maus odores</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● Substancial investimento de capital;</li><li>● Alto custo operacional;</li><li>● Supervisão contínua;</li><li>● Possibilidade de resíduos aerossóis;</li><li>● Necessidade de tratamento do lodo e da sua disposição</li></ul>

Fonte: adaptado de von Sperling (1997).

### 3.3.1.2 Processos anaeróbios

Em princípio, todos os compostos orgânicos podem ser degradados pela via anaeróbia, sendo que o processo se mostra mais eficiente e mais econômico quando os dejetos são facilmente biodegradáveis. Os reatores anaeróbios têm sido largamente aplicados para o tratamento de resíduos sólidos, incluindo culturas agrícolas, dejetos de animais, lodos de ETE's e lixo urbano, estimando-se que milhões de digestores anaeróbios tenham sido construídos em todo o mundo com esse propósito. A digestão anaeróbia tem sido muito aplicada para o tratamento de efluentes de indústrias agrícolas, alimentícias e de bebidas, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento, (CHERNICHARO, 1997). Esses reatores são bastante atrativos, sobretudo para países de clima tropical e subtropical, devido às diversas vantagens que oferecem, principalmente nos requisitos baixo consumo de energia e baixa formação de lodo, o que implica na redução de custos operacionais. (MACHADO et al, 2002).

A Tabela 3.15 apresenta as principais tipologias industriais que são passíveis de utilização de reatores anaeróbios no tratamento de efluentes líquidos.

**Tabela 3.15** – Principais indústrias cujos efluentes podem ser tratados pela via anaeróbia

● Abatedouros/frigoríficos	● Produção de álcool	● Processamento de batatas
● Cervejaria	● Produção de amido	● Processamento de café
● Curtumes	● Produção de fermento	● Processamento de frutas
● Laticínios	● Produção de refrigerantes	● Processamento de peixes
● Produção de açúcar	● Produção de vinhos	● Processamento vegetais

Fonte: GTZ-TBW (1997), citado por Chernicharo (1997).

A Tabela 3.16 apresenta uma análise comparativa dos sistemas anaeróbios.

**Tabela 3.16** – Análise comparativa das principais vantagens e limitações dos sistemas anaeróbios.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"><li>● Baixa produção de lodo (5 a 10 vezes menor que os processos aeróbios);</li><li>● Baixo consumo de energia;</li><li>● Baixa demanda de área;</li><li>● Baixo custo de implantação;</li><li>● Requer menor quantidade de nutrientes;</li><li>● Produção de metano, que é um gás combustível;</li><li>● Possibilidade de preservar a biomassa sem alimentação por vários meses.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● A partida do sistema pode ser lenta na ausência de lodo de semente adaptado;</li><li>● Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento restritivos;</li><li>● Possibilidade de maus odores (podendo ser controlados);</li><li>● Possibilidade de efluente com aspecto desagradável;</li><li>● Necessidade usual de pós-tratamento.</li></ul>

Fonte: adaptado de Chernicharo (1997) e von Sperling (1995).

Dentre os sistemas anaeróbios, destacam-se os de manta de lodo (UASB), filtro anaeróbio e os tanques sépticos, sendo que no presente trabalho dar-se-á ênfase ao filtro anaeróbio.

O filtro anaeróbio é uma unidade de tratamento que opera com fluxo descendente (menos comum) ou ascendente. Nesse último caso o efluente entra na parte inferior do reator, saindo na parte superior. É basicamente um processo de contato, no qual os efluentes passam através de uma massa de sólidos biológicos que está agregada a um meio suporte dentro do reator. O meio suporte pode ser de pedra britada, blocos cerâmicos, anéis plásticos, escórias de alto forno, esferas de polietileno, bambu, etc., no qual a biomassa permanece aderida.

O filtro ascendente fica submerso e os espaços vazios existentes entre a brita ou outro meio suporte são preenchidos com o efluente líquido. O meio suporte ocupa entre 50 e 70% de profundidade do filtro.

Um dos principais problemas verificados na operação de filtros anaeróbios é a colmatação ou entupimento do meio suporte. Para evitar esse problema, é preciso instalar previamente dispositivos de limpeza ao longo da altura do filtro que permitam a retirada do excesso de sólidos retidos no meio suporte, além de uma cuidadosa operação do pré-tratamento e um descarte periódico do excesso de lodo.

Dentre os sistemas anaeróbios, o filtro tem sido o principal reator empregado no tratamento de efluentes de indústrias de laticínios, sendo projetado com tempos de detenção variando entre 13 e 72 horas, sem reciclo e com altura do meio suporte (brita) na faixa de 1,0 m. No Estado de São Paulo, o efluente final dos filtros anaeróbios é enviado para a rede coletora de esgotos, principalmente por não atender aos padrões de lançamento em corpos receptores. (MACHADO et al, 2002).

A necessidade de adequar o efluente tratado aos requisitos da legislação ambiental e proporcionar proteção aos corpos d'água receptores, muitas vezes requer a utilização de algum tipo de pós-tratamento dos efluentes dos reatores anaeróbios. O principal papel do pós-tratamento é o de complementar a remoção da matéria orgânica, bem como proporcionar a remoção de constituintes pouco afetados no tratamento anaeróbio.

A Tabela 3.17 resume os principais sistemas de tratamento de efluentes em nível secundário, utilizados em indústrias de laticínios, assim como suas respectivas faixas de eficiências na remoção de DBO<sub>5</sub>.

**Tabela 3.17** – Principais sistemas de tratamento de efluentes utilizados nas indústrias de laticínios.

Sistema	Variantes do sistema	Mecanismos de remoção de DBO	Eficiência na remoção de DBO (%)
Lodos ativados	LA convencional	Aeróbio	85 – 93
	LA aeração prolongada	Aeróbio	93 – 98
	LA fluxo intermitente	Aeróbio	85 – 93
	Valos de oxidação	Aeróbio	93 - 98
Lagoas de estabilização	Lagoas facultativas	Aeróbio/anaeróbio	70 – 85
	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	Aeróbio/anaeróbio	70 – 90
	Lagoa aerada facultativa	Aeróbio/anaeróbio	70 – 90
Biofilmes	Filtro biológico	Aeróbio	80 – 93
Reatores anaeróbios	Filtro anaeróbio	Anaeróbio	70 – 90
	Reator UASB	Anaeróbio	60 – 80
Disposição no solo	Infiltração lenta	Vários mecanismos	94 – 99
	Infiltração rápida		86 – 98
	Infiltração sub-superficial		90 – 98
	Escoamento superficial		85 – 95

Nota: LA – Lodos ativados.

Fonte: adaptado de Machado et al (2002).

Uma análise comparativa das principais características dos sistemas de tratamento de efluentes líquidos utilizados nas indústrias de laticínios é apresentada na Tabela 3.18.

**Tabela 3.18** – Análise comparativa das principais características dos sistemas de tratamento

Sistema	Variantes do sistema	Qualidade efluente final	Custo Implant.	Custo operac.	Necessidade de área
<b>Lodos ativados</b>	LA convencional	+++	alto	alto	baixo
	LA aeração prolongada	+++	alto	alto	baixo
	LA fluxo intermitente	+++	alto	alto	baixo
	Valos de oxidação	+++	alto	alto	baixo
<b>Lagoas de estabilização</b>	Lagoas facultativas	++	médio	baixo	alto
	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	++	médio	baixo	alto
	Lagoa aerada facultativa	++	médio	médio	médio
<b>Biofilmes</b>	Filtro biológico	++	médio	baixo	baixo
<b>Reatores anaeróbios</b>	Filtro anaeróbio	+	baixo	baixo	baixo
	Reator UASB	+	baixo	baixo	baixo
<b>Disposição no solo</b>	Infiltração lenta	+++	médio	baixo	alto
	Infiltração rápida	+++	baixo	baixo	alto
	Infiltração sub-superficial	+++	baixo	baixo	alto
	Escoamento superficial	+++	baixo	baixo	alto

Notas: +++ excelente                      ++ boa                      + razoável.  
As gradações sugeridas podem variar muito com as condições locais.

Fonte: adaptado de von Sperling (1995) e EPA (1973).

### 3.4 Fundamentos da digestão anaeróbia

A decomposição anaeróbia da matéria orgânica é caracterizada por uma seqüência de reações, as quais são realizadas por diferentes tipos fisiológicos de microrganismos anaeróbios (van LIER, 1995). A digestão anaeróbia representa um sistema ecológico delicadamente balanceado, onde cada microrganismo tem uma função essencial (CHERNICHARO, 1997).

Apesar da real complexidade da bioquímica da degradação anaeróbia, algumas etapas do processo são bem caracterizadas, sobretudo com relação aos grupos de microrganismos responsáveis por realizá-las. São três os principais grupos de microrganismos que participam da digestão anaeróbia:

- Bactérias fermentativas: transformam, por hidrólise, os polímeros em monômeros, e estes em acetato, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e outros produtos, como a glicose;
- Bactérias acetogênicas: produtoras de hidrogênio, as quais convertem os produtos gerados pelo primeiro grupo (aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois) em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- Arqueas metanogênicas: são divididas em dois diferentes grupos. Um grupo usa o acetato, transformando-o em metano e dióxido de carbono, enquanto o outro produz metano através da redução de dióxido de carbono.

### 3.4.1 Hidrólise

As bactérias não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada (CHERNICHARO, 1997). Assim, as bactérias fermentativas hidrolisam os compostos orgânicos complexos, por meio da ação de enzimas extracelulares, convertendo polímeros (carboidratos, proteínas, lipídeos etc.) em monômeros (açúcares, aminoácidos, peptídeos etc.) os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas.

Os compostos solúveis resultantes podem ser acessíveis às bactérias, atravessando suas paredes celulares e membranas. Essa fase é considerada muito lenta e durante essa fase os carboidratos são hidrolisados a açúcares simples e as proteínas a aminoácidos. A temperatura do reator, o tempo de residência, a composição do substrato, o tamanho das partículas, o pH do meio, a concentração de  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  e a concentração de produtos da hidrólise podem influenciar a taxa e o grau de hidrólise do substrato (CHERNICHARO, 1997).

De acordo com Miron et al (2000), que estudaram o efeito da idade do lodo na hidrólise e acidificação de compostos orgânicos, durante a digestão anaeróbia de lodo proveniente de tratamento primário, a uma temperatura de 25° C, a hidrólise deve ser considerada a etapa limitante no processo de digestão anaeróbia, para todos os tipos de substratos particulados (carboidratos, proteínas e lipídios) presentes no lodo.

A etapa de hidrólise é realizada por vários tipos de bactérias. As principais bactérias proteolíticas presentes em digestores anaeróbios pertencem ao gênero *Clostridium*, sendo encontradas também *Peptococcus anaerobicus*, *Bifidobacterium sp.*, *Staphylococcus* e algumas espécies de bacilos. Bactérias da espécie *Anaerovibrio lipolytica* são capazes de hidrolisar os triglicerídeos a ácidos graxos e glicerol, enquanto o amido é degradado por várias bactérias (*Bacteroides*, *Clostridium*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*), sendo hidrolisado pela ação da enzima amilase (McINERNEY, 1988).

### 3.4.2 Acidogênese

Os produtos solúveis oriundos da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, os quais são então excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis (ácido propiônico, butírico, valérico, isovalérico, capróico, acético), álcoois, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono, além de novas células bacterianas. Esse estágio é denominado de fase ácida devido à grande quantidade de ácidos formados, além de

novas células bacterianas. Como os ácidos graxos voláteis são o principal produto dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas.

A acidogênese é efetuada por um grande e diverso grupo de bactérias fermentativas, a exemplo das espécies *Clostridium* e *Bacteroids*. As primeiras constituem uma espécie anaeróbia que forma esporos, podendo, dessa forma, sobreviver em ambientes totalmente adversos. As *Bacteroids* encontram-se comumente presentes nos tratos digestivos, participando da degradação de açúcares e aminoácidos. A maioria das bactérias acidogênicas é anaeróbia estrita, mas cerca de 1% consiste de bactérias facultativas que podem oxidar o substrato orgânico por via oxidativa. Isso é particularmente importante, uma vez que as bactérias anaeróbias estritas são protegidas contra a exposição ao oxigênio eventualmente presente no meio (van HAANDEL & LETTINGA, 1994; LETTINGA et al., 1996 citados por CHERNICHARO, 1997).

Os mais importantes ácidos voláteis intermediários, precursores da formação de metano, são o acético e o propiônico. Para a completa fermentação de compostos complexos em metano, cada grupo de microrganismos tem uma função específica. Mesmo que a contribuição para o processo como um todo seja pequena, ainda assim esta é necessária para a formação do produto final. O ácido propiônico resulta principalmente da fermentação dos carboidratos e proteínas presentes no efluente, enquanto o ácido acético é o ácido intermediário mais abundante, sendo formado praticamente a partir de todos os compostos orgânicos (CHERNICHARO, 1997).

De acordo com McCarty (1964), citado por Chernicharo (1997), para a degradação de lodos, o ácido acético é precursor de cerca de 72% da produção total de metano. Já os estudos realizados por Pontes et al. (2002), para um reator UASB em escala piloto, operando com tempos de detenção hidráulica de 4,2 e 5,6 horas e carga orgânica volumétrica afluyente de 1,2 kg DBO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> (1,6 kgDQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>) e 1,5 kgDBO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> (2,3 kgDQO.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>), indicaram que os principais ácidos formados na degradação anaeróbia de esgotos sanitários foram os ácidos acético e butírico, tendo ocorrido um decaimento de suas concentrações no reator anaeróbio em função da altura. Um decaimento de concentrações semelhante foi apresentado por Laubscher et al. (2001) para as concentrações de ácido acético, ácido propiônico e DQO em um reator UASB.

Quando a população de microrganismos metanogênicos se encontra presente em quantidade adequada, os ácidos são degradados a medida em que são formados, não se acumulando além da capacidade neutralizadora do meio e o pH permanece na faixa favorável para as archaeas metanogênicas.

### **3.4.3 Acetogênese**

As bactérias acetogênicas desempenham um papel importante, porém intermediário, na degradação bacteriana anaeróbia da matéria orgânica, produzindo acetato,  $H^+$  e  $CO_2$ , os quais são substratos metanogênicos (FLORÊNCIO, 1994). O acetato é o maior precursor direto para a metanogênese em sistemas de tratamento de esgotos, nas condições mesofílicas e termofílicas, contabilizando aproximadamente 70-80% do metano produzido (van LIER, 1995).

Durante a formação dos ácidos acético e propiônico, uma grande quantidade de  $H_2$  é formada, fazendo com que o valor do pH do meio aquoso decresça, em função da disponibilidade de  $H^+$ . Há, porém, duas formas pelas quais o hidrogênio é consumido no meio: i) através das bactérias metanogênicas, que utilizam hidrogênio e dióxido de carbono para produzir metano; e ii) através da formação de ácidos orgânicos, tais como propiônico e butírico, ácidos estes formados através da reação de hidrogênio com dióxido de carbono e ácido acético.

### **3.4.4 Metanogênese**

As archaeas metanogênicas cumprem a última e limitante etapa da digestão anaeróbia. A metanogênese resulta na formação de metano ( $CH_4$ ), seja a partir do acetato, representando a remoção da matéria orgânica original, ou a partir do  $H_2$  e  $CO_2$ , permitindo um equilíbrio do sistema, por meio da manutenção da pressão parcial de  $H_2$  em níveis satisfatórios. Destarte, as metanogênicas desempenham duas funções primordiais: elas produzem um gás insolúvel (metano), possibilitando a remoção do carbono orgânico do ambiente anaeróbio, além de utilizarem o hidrogênio, favorecendo o ambiente para que as bactérias acidogênicas fermentem compostos orgânicos com produção de ácido acético, o qual é convertido a metano (CHERNICHARO, 1997).

As metanogênicas utilizam somente um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Em função de sua afinidade por substrato e magnitude de produção de metano, as metanogênicas são divididas em dois grupos principais, um que forma metano a partir de

ácido acético ou metanol, e o segundo que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono, como a seguir (CHERNICHARO, 1997):

#### 3.4.4.1 Metanogênicas acetoclásticas

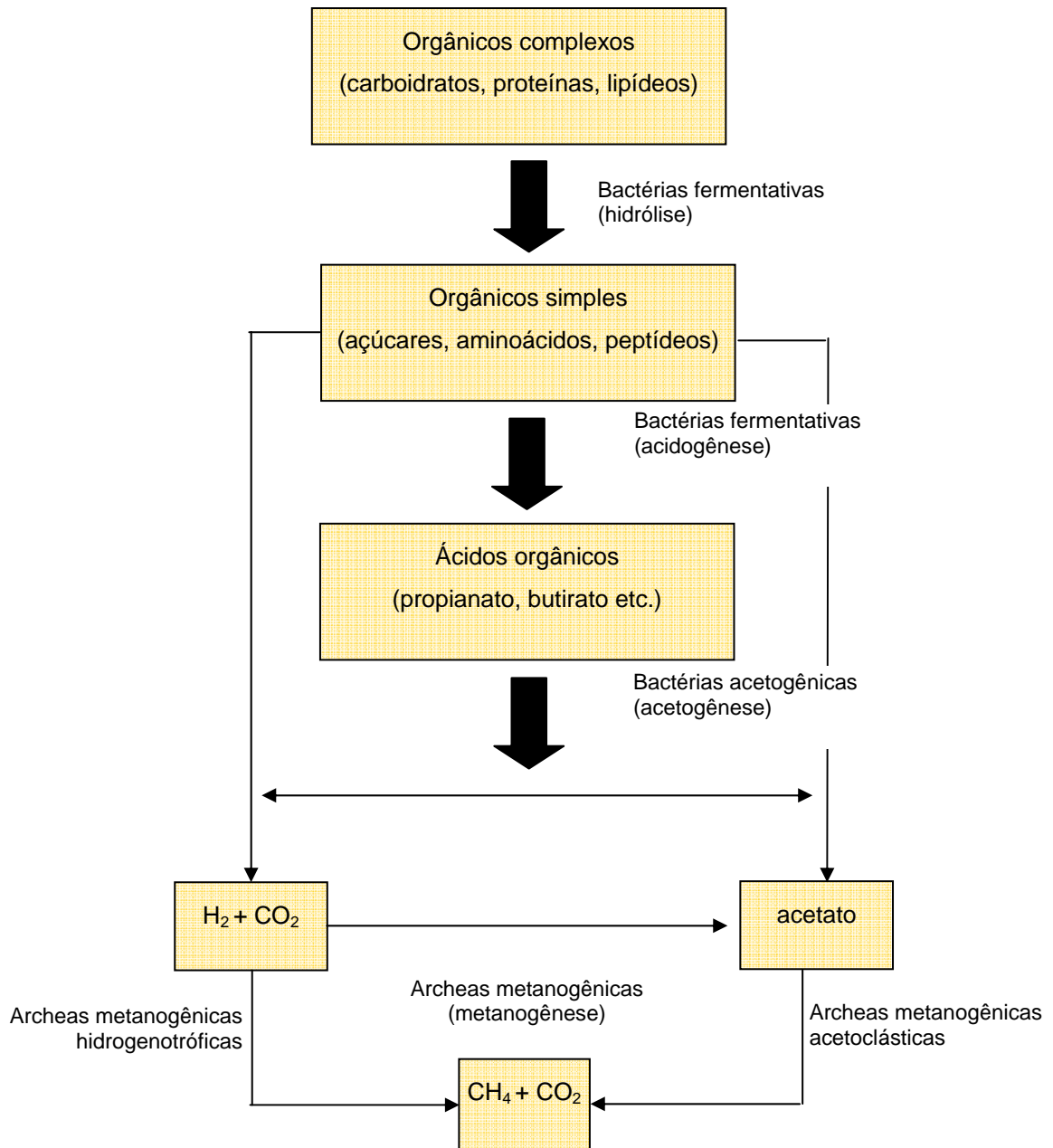
Embora apenas poucas espécies de metanogênicas sejam capazes de formar metano a partir do acetato, estes são normalmente os microrganismos predominantes na digestão anaeróbia. São responsáveis por cerca de 60 a 70% de toda a produção de metano, a partir do grupo metil do ácido acético. Pertencem a dois gêneros principais: *Methanosarcina* e *Methanosaeta*. O gênero *Methanosaeta* caracteriza-se por utilizar exclusivamente o acetato, tendo, por este, mais afinidade que as *Methanosarcinas*. Desenvolvem-se na forma de filamentos e têm grande importância na formação da trama bacteriana presente nos grânulos. Os organismos pertencentes ao gênero *Methanosarcina* se desenvolvem na forma de cocos, que se agrupam formando pacotes. São considerados os mais versáteis entre os metanogênicos, já que possuem espécies capazes de utilizar também o hidrogênio e as metilaminas (SOUBES, 1994, citado por CHERNICHARO, 1997).

#### 3.4.4.2 Metanogênicas hidrogenotróficas

Ao contrário das acetoclásticas, praticamente todas as espécies conhecidas de arqueas metanogênicas são capazes de produzir metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Os gêneros mais frequentemente isolados em reatores anaeróbios são: *Methanobacterium*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter*.

Tanto as arqueas metanogênicas acetoclásticas quanto as hidrogenotróficas são muito importantes na manutenção do curso da digestão anaeróbia, uma vez que estas são responsáveis pela função essencial de consumir o hidrogênio produzido nas fases anteriores. Com isso, é propiciado o abaixamento da pressão parcial de hidrogênio no meio, tornando possíveis as reações de produção das acidogênicas e acetogênicas.

A Figura 3.2 apresenta as principais etapas da digestão anaeróbia, desde a quebra do substrato complexo à geração dos produtos finais, constituintes do biogás, bem como os organismos envolvidos no processo.



**Figura 3.2** – Fluxograma da digestão anaeróbia e grupos de microrganismos envolvidos  
 Fonte: adaptado de Chernicharo (1997)

Não obstante ao exposto, essas fases convencionais da conversão anaeróbia podem ser alteradas mediante situações específicas. Condições de temperaturas extremas, a exemplo das termofílicas extremas, substratos muito específicos, como aqueles com predominância de metanol, ou mesmo com concentrações consideráveis de compostos de enxofre em relação às de substratos carbonáceos, podem suprimir algumas rotas mais clássicas ou criar rotas alternativas de degradação. Há indicativos de que sob extremas condições termofílicas, a metanogênese hidrogenotrófica é a principal responsável pela remoção final de DQO de águas residuárias, (van LIER, 1995). Durante a biodegradação contínua de metanol, por culturas

mistas, em lodo granular de reatores UASB, as metanobactérias metilotróficas e as bactérias acetogênicas competem fortemente pelo substrato (FLORÊNCIO, 1994). Com a presença de sulfato numa água residuária, muitos compostos intermediários, formados através das rotas metabólicas clássicas, passam a ser utilizados por bactérias sulforedutoras, provocando uma alteração das rotas metabólicas nos digestores anaeróbios (CHERNICHARO, 1997).

### 3.4.5 Sulfetogênese

Despejos que contenham compostos de enxofre passam ainda pela etapa de sulfetogênese, durante a qual, sulfatos, sulfitos e outros compostos que contenham enxofre são reduzidos a sulfetos, devido à ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias redutoras de sulfato ou sulforedutoras. As bactérias sulforedutoras dividem-se em dois grupos: (1) bactérias sulforedutoras que oxidam seus substratos de forma incompleta até o acetato (*Desulfobulbus*, *Desulfomonas* e a maioria do gênero *Desulfotomaculum* e *Desulfovibrio*); (2) Bactérias sulforedutoras que oxidam seus substratos completamente até gás carbônico (*Desulfobacter*, *Desulfococcus*, *Desulfosarcina*, *Desulfobacterium* e *Desulfofema*) (VISSER, 1995).

### 3.5 Fatores ambientais que afetam o processo anaeróbio

Para que o processo anaeróbio apresente uma boa eficiência, é necessário que se observe a relação entre os microrganismos participantes do processo e as condições ambientais necessárias ao seu desenvolvimento. As principais condições ambientais que devem ser controladas para o desenvolvimento da degradação anaeróbia são o pH, a temperatura, a presença de nutrientes e a ausência de materiais tóxicos. Na Tabela 3.19 são apresentadas algumas condições favoráveis aos microrganismos anaeróbios.

**Tabela 3.19** - Condições ambientais ótimas para os microrganismos anaeróbios

Parâmetros	Faixa de variação
pH	6,8 a 7,5
Temperatura	
Classe Mesófila	25 a 40 °C
Classe Termófila	40 a 65 °C
Nutrientes	
Nitrogênio	2,72 mg.gDBO <sup>-1</sup>
Fósforo	0,45 mg.gDBO <sup>-1</sup>
Material Tóxico	Ausência

Fonte: adaptado de Chernicharo (1997) e Nascimento (2000)

### **3.5.1 pH, alcalinidade e ácidos voláteis**

O controle do pH é de grande importância nos reatores anaeróbios, atuando no sentido de eliminar o risco de inibição das archaeas metanogênicas. Uma alta taxa de metanogênese só ocorre quando o pH se mantém em uma faixa próxima do valor neutro. Um pH menor que 6,3 ou maior que 7,8 provoca uma diminuição rápida na metanogênese (van HAANDEL e LETTINGA, 1994). Se a taxa de remoção de ácidos pela metanogênese não acompanhar a taxa de produção de ácidos na acidogênese, pode ocorrer uma instabilidade no reator, com diminuição do pH seguida de uma maior redução na metanogênese e de um aumento na produção líquida de ácidos.

A interação entre a alcalinidade e os ácidos voláteis é fundamentada na capacidade da alcalinidade do sistema em neutralizar os ácidos formados na degradação anaeróbia e em tamponar o pH no caso de acúmulo de ácidos voláteis. As principais fontes de alcalinidade do sistema são as proteínas, que liberam amônia durante a hidrólise, e o acetato que gera bicarbonato. Para pH entre 6,0 e 7,5 o tamponamento se deve quase que totalmente aos bicarbonatos (van HAANDEL e LETTINGA, 1994).

### **3.5.2 Temperatura**

A temperatura é de grande importância na digestão anaeróbia, atuando na seleção das espécies, já que essas não possuem meios de controlar sua temperatura interna. Alterações na temperatura podem ocasionar um desequilíbrio na atividade biológica, que poderá provocar variações em vários parâmetros (alcalinidade, pH, ácidos voláteis, produção de gás, dentre outros). A temperatura influencia, ainda, as taxas das reações enzimáticas e as taxas de difusão de substrato. Pode-se conseguir uma considerável redução no volume do reator anaeróbio se ele for operado próximo à temperatura ótima para o desenvolvimento da população microbiana. Entretanto, mudanças bruscas de temperatura podem levar a um desbalanceamento entre as bactérias acidogênicas e as archaeas metanogênicas (CHERNICHARO, 1997).

A formação microbiana de metano apresenta duas faixas ótimas de temperatura, uma na faixa mesófila (30 a 35 °C) e outra na faixa termófila (50 a 55 °C). Abaixo de 20 °C, a produção de gás apresenta uma grande diminuição (CHERNICHARO, 1997).

### 3.5.3 Nutrientes

Para que o processo biológico apresente uma boa eficiência, os nutrientes devem ser fornecidos na proporção adequada. Os requisitos nutricionais das populações microbianas podem ser determinados a partir da composição empírica das células microbianas. Os esgotos sanitários, de uma maneira geral, apresentam os diferentes tipos de nutrientes em concentrações adequadas. Efluentes industriais, entretanto, por apresentar composições mais específicas, podem necessitar de um fornecimento adicional de nutrientes.

O nitrogênio é o nutriente necessário em maiores quantidades para o crescimento dos microrganismos. A concentração de fósforo é, geralmente, 1/5 a 1/7 do valor estabelecido para o nitrogênio. As seguintes relações podem ser utilizadas para esgoto doméstico (LETTINGA et al, 1996):

- Biomassa com baixo crescimento de produção celular ( $Y \approx 0,05$  gSSV/gDQO)  
Degradação de ácidos graxos voláteis  
 $DQO : N : P = 1000 : 5 : 1$  ou  $C : N : P = 330 : 5 : 1$
- Biomassa com baixo crescimento de produção celular ( $Y \approx 0,05$  gSSV/gDQO)  
Degradação de carboidratos  
 $DQO : N : P = 350 : 5 : 1$  ou  $C : N : P = 130 : 5 : 1$

Outros nutrientes (enxofre, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B12) são necessários em menor quantidade.

A seguinte relação pode ser utilizada para esgotos de laticínios (adaptado de CETESB, 1990)

$$DQO : N : P = 250 : 5 : 1$$

### 3.5.4 Compostos tóxicos

Alguns tipos de substâncias químicas, como metais pesados e compostos organo-clorados, são tóxicos, mesmo em baixas concentrações. Entretanto, no caso de esgotos domésticos, é muito pouco provável a presença dessas substâncias em concentrações inibidoras. Sulfeto e oxigênio são compostos tóxicos que podem estar presentes nos esgotos. Se bolhas de ar estiverem no afluente e forem carregadas para o interior do reator, entrando em contato com o lodo metanogênico, pode ocorrer inibição da sua atividade. De acordo com SPEECE (1986), uma concentração de  $170 \text{ mg H}_2\text{S.L}^{-1}$  pode ser tolerada em reatores UASB. Amônia livre em

concentrações acima de  $150 \text{ mg.L}^{-1}$  se torna tóxica, enquanto o íon amônio apresenta um limite máximo de  $3000 \text{ mg.L}^{-1}$  (McCARTY, 1964, citado por CHERNICHARO, 1997).

### **3.6 Degradação de matéria orgânica específica**

Pouco se sabe sobre a degradação de matéria orgânica específica (carboidratos, proteínas e lipídios) em reatores anaeróbios. Alguns estudos têm sido realizados de maneira a se analisar o processo de tratamento anaeróbio em função da composição de carboidratos, proteínas e lipídios no afluente, entretanto, esses estudos ainda são limitados.

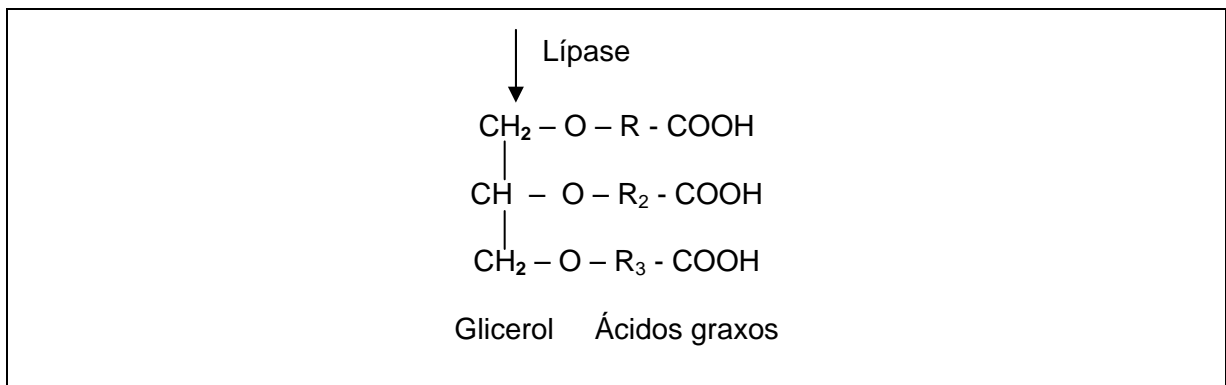
Dentre os compostos citados, os lipídios merecem atenção especial neste estudo, pois está presente em grandes concentrações nos efluentes gerados pelas indústrias de laticínios.

De acordo com Metcalf e Eddy (1991), cerca de 75% dos sólidos suspensos e 40% dos sólidos filtráveis presentes em águas residuárias são de natureza orgânica, tendo-se uma proporção de 25 a 50% de carboidratos, 40 a 60% de proteínas e cerca de 10% de óleos e graxas. Raunkjaer et al (1994), observaram teores de 18, 28 e 31% para carboidratos, proteínas e lipídios, respectivamente, enquanto Dignac et al (2000), concluíram que aminoácidos, carboidratos, lipídios e compostos fenólicos contribuem com 46% do carbono orgânico presente no esgoto.

#### **3.6.1 Lipídios**

Os lipídios ocorrem na forma de suspensão nas águas, causando danos nas estações de tratamento e nos corpos d'água receptores. Entretanto, de acordo com Blundi (1988), faltam dados sobre os níveis e características dos lipídios presentes nos esgotos, provavelmente devido a problemas de identificação e quantificação pelos métodos analíticos rotineiros.

Os lipídios são ésteres de ácidos graxos de cadeia longa (Figura 3.3). Os óleos apresentam-se no estado líquido à temperatura ambiente e as gorduras são sólidas nessas condições. Os lipídios são compostos orgânicos muito estáveis, de difícil degradação por bactérias, podendo ser problemáticos no processo de tratamento de águas residuárias. Efluentes de indústrias de refino de óleo comestível, de processamento de lã, de laticínios, matadouros, fábricas de margarina e frigoríficos apresentam grande quantidade de lipídios. A adsorção de lipídios à biomassa, em reatores anaeróbios, pode ocasionar a desintegração do grânulo (SAMSON et al, 1985) e o seu acúmulo como espuma no topo de reatores anaeróbios pode provocar entupimento de linhas de saída de gases e de efluentes (ANDERSEN e SCHMID, 1985).



**Figura 3.3** Ação da lípase na hidrólise de lipídios

Em relação à degradação anaeróbia de lipídios, sabe-se que os triglicerídeos são hidrolisados a ácidos graxos de cadeia longa e oxidados a acetato ou propionato (MIRON et al, 2000). De acordo com Hanaki et al (1981), os ácidos graxos de cadeia longa, formados na degradação de lipídios, podem inibir sua própria degradação e a produção de metano a partir do acetato.

As dificuldades no tratamento de efluentes com alto teor de lipídios e polifenóis foram avaliadas por Beccari et al (1999). O uso de bentonita e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  foi realizado em experimentos em escala de laboratório para determinação da melhor opção e condições para pré-tratamento, na otimização do processo do tratamento anaeróbio. O efluente utilizado no tratamento apresentava  $5,1 \text{ g.L}^{-1}$  polifenóis,  $3,1 \text{ g.L}^{-1}$  de ácido oléico e  $11,1 \text{ g.L}^{-1}$  de lipídeos,  $\text{pH}=4,4$  e  $\text{DQO}= 92,6 \text{ g.L}^{-1}$ . O sistema consistiu de um reator onde se adicionava hidróxido de cálcio e bentonita para o pré-tratamento, seguido de um reator para o tratamento anaeróbio. Uma sedimentação final separava o lodo que era reciclado. O pH ótimo para o pré-tratamento é também apropriado para a acidogênese, logo, pode-se usar um processo em duas fases: pré-tratamento/acidogênese (1ª fase) seguido da metanogênese (2ª fase).

O tratamento de efluentes de indústrias de lã foi estudado por Gutierrez et al (1999). Um reator anaeróbio de 57 litros foi utilizado com uma carga orgânica de 3 a 5  $\text{kg DQO.m}^{-3}.\text{dia}^{-1}$ . O efluente apresentava 71% de óleos e graxas e foi analisada a possibilidade do uso do processo anaeróbio na sua degradação. A cera de lã é composta por uma mistura de ésteres, de colesterol, lanoesterol e outros esteróis. A parte ácida dos esteróis contém cadeias de ácidos graxos com 7 a 41 carbonos. Os resultados do trabalho indicaram que os ácidos graxos obtidos na hidrólise das graxas foram degradados pelos microrganismos enquanto os esteróis acumularam-se no lodo. A partir desses resultados pode-se dizer que, para o efluente estudado, não é possível degradar anaerobicamente mais do que 50% da graxa total presente. A remoção de DQO foi de 40 a 55%.

### 3.6.2 Substratos complexos

Vidal et al (2000) estudaram a influência da proporção de lipídios na degradação anaeróbia de efluente de laticínio. Foi estudada a degradabilidade de dois tipos de águas residuárias, com proporção de lipídios, proteínas e carboidratos de 1,7/0,57/1 e 0,05/0,54/1 e com DQO variando de 400 a 20000 mg.L<sup>-1</sup>. Os pesquisadores observaram uma degradação mais lenta para a água residuária com maior proporção de lipídios, provavelmente devido à hidrólise mais lenta desses compostos. Entretanto, para a amostra estudada, esse fator foi benéfico, pois diminuiu a acumulação de ácidos graxos voláteis no processo e favoreceu o processo de degradação.

Os estudos sobre a degradação de lipídios, carboidratos e proteínas para esgotos sanitários e lodos ainda são restritos, entretanto, pode-se destacar o trabalho de Miron et al (2000), que estudaram o uso de um reator de mistura completa para o tratamento de lodo primário. Avaliou-se o efeito do tempo de residência celular (idade do lodo) no processo. O reator de mistura completa foi alimentado com lodo primário e observou-se um aumento na hidrólise de lipídios e carboidratos com o aumento no tempo de residência celular, quando o reator era operado em condições acidogênicas, entretanto, isso não foi observado para proteínas.

Estudos sobre as rotas de formação de metano a partir de substratos complexos (lodos de estações de tratamento de esgotos ou outros de composição similar) indicam que cerca de 30% do material orgânico é convertido em ácido propiônico (que é resultante da fermentação de carboidratos e proteínas). O ácido acético é o mais abundante, sendo formado a partir de praticamente todos os compostos orgânicos. Para substratos complexos, o ácido acético é precursor de cerca de 72% do metano formado. Os ácidos acético e propiônico são responsáveis por 85% da produção total de metano e os 15% restantes se originam dos outros ácidos (McCARTY, 1964, citado por CHERNICHARO, 1997).

### **3.7 Tratamento de efluentes com a utilização de filtro anaeróbio**

Young e Yang (1989) afirmaram que durante os anos de 1950 e 1960 os sistemas de tratamento anaeróbicos ganharam a reputação de serem sistemas onerosos em suas implantações devido às baixas cargas orgânicas aplicadas e dificuldades operacionais freqüentes. Entretanto, os problemas foram em grande parte produto da falta de conhecimento a respeito da microbiologia e da bioquímica das reações anaeróbias.

Pesquisas desenvolvidas durante os últimos vinte anos identificaram um grande número de novas formas de reatores que possibilitaram o aumento da taxa de aplicação da carga orgânica, reduzindo-se os custos de implantação, assim como o aumento do conhecimento sobre a microbiologia anaeróbia e o controle mensurável das reações químicas ajudou de forma significativa o controle operacional dos reatores anaeróbios.

Uma grande virada na questão da tecnologia do tratamento anaeróbio veio no final dos anos 60 com o desenvolvimento do filtro anaeróbio: em primeiro lugar devido à sua grande capacidade de retenção de sólidos, que possibilita o tratamento de efluentes com elevadas concentrações de DQO (de 2.000 a 20.000 mg/L) e em segundo lugar devido ao processo ser bastante estável, mesmo operando com oscilações de cargas e vazões, isso graças à biomassa retida nos interstícios do meio suporte do filtro. A partir de 1972, os filtros anaeróbios já operavam com cargas orgânicas que variavam de um mínimo de 0,2 kgDQO/m<sup>3</sup>.d até um valor máximo de 16 kgDQO/m<sup>3</sup>.d, com tempos de detenção hidráulica variando de 12 a 96 horas, tratando desde esgotos domésticos com concentrações de DQO na faixa de 100 a 150 mg/L, até efluentes de indústria de destilação de rum com concentrações mais elevadas (85.000 mg/L). As eficiências de remoção de DQO situam-se na faixa de 60 a 90%, a depender do tipo de efluente a ser tratado, quando operados com cargas orgânicas entre 8 e 15 kg DQO/m<sup>3</sup>.d. (YOUNG E YANG, 1989).

### **3.8 Tratamento de efluentes de laticínios utilizando filtro anaeróbio**

Kasapgil et al (1994) demonstraram que um filtro anaeróbio em escala de demonstração, operando com tempo de detenção hidráulica de 20 horas, foi capaz de remover 85% da concentração de DQO em um laticínio na Inglaterra, que processa em torno de um milhão de litros de leite/dia e gera aproximadamente 700 m<sup>3</sup> de efluente por dia.

As concentrações médias de DQO e sólidos do efluente da fábrica são de 3000 mg/L e 200 mg/L respectivamente, sendo que a composição química do efluente do laticínio em questão é apresentada na Tabela 3.20.

**Tabela 3.20** – Composição química do efluente do laticínio no estudo de Kasapgil

Parâmetro	Concentração (mg/L)
DQO	2000 – 6000
DBO <sub>5</sub>	1200 – 4000
Sólidos suspensos	350 – 1000
Sólidos suspensos voláteis	330 – 940
Alcalinidade (CaCO <sub>3</sub> )	150 – 300
Óleos e graxas	300 -500

Fonte: adaptado de Kasapgil et al (1994).

O processo de tratamento existente, avaliado por Kasapgil et al 1994, seria totalmente incapaz de atingir os padrões de lançamento da legislação local, na qual a concentração de DQO requerida para o lançamento no rio deveria ser menor que 125 mg/L.

Kasapgil et al (1994) avaliaram que para uma carga orgânica de 6 kg DQO/m<sup>3</sup>.d, com um tempo de detenção hidráulica de 20 horas, o desempenho do filtro anaeróbio permaneceu estável, com DQO de saída geralmente menor que 400 mg/L e resultando em uma eficiência média de remoção em torno 85%. A concentração de SS no efluente do filtro anaeróbio permaneceu relativamente constante durante o estudo. Apenas para um curto período, durante a partida, a concentração de SS no efluente foi maior, sendo principalmente devido à lavagem da biomassa leve e não aderida, que gradualmente diminuiu, assim como mais biomassa aderida ao meio aumentou.

Ince et al (2000) investigaram a adesão, força e performance de um meio poroso médio em um filtro anaeróbio de fluxo ascendente tratando efluente de laticínios. A quantidade de biomassa aderida foi maior no fundo e no anel central do filtro 103 mg SSV.L<sup>-1</sup>, e menor no topo 23 mg SSV.L<sup>-1</sup>, apresentando uma média de 55mg SSV.L<sup>-1</sup>. Foi medida uma redução média de 50% na força de compressão do meio de vidro sinterizado após 8 meses de operação. O filtro foi operado com uma carga orgânica de 21 kg DQO/ m<sup>3</sup>.dia, com tempo de detenção hidráulica de 0,5 dia, atingindo uma remoção média de DQO de 80% para a maior parte do período de operação.

Fatores que afetam a adesão ao biofilme são variados e numerosos. Foi descoberto que existem fortes correlações entre tamanho, peso, forma, porosidade e área superficial específica do material retido com a performance de filtros anaeróbios. O material de preenchimento ideal para filtros anaeróbios foi descrito como aquele que maximiza área

superficial específica e porosidade. Os benefícios de se utilizar um meio suporte altamente poroso foram demonstrados usando um poro aberto de meio de vidro sinterizado. Foi mostrado que em *start-ups* e em estado estacionário, boas performances são atingíveis operando-se com cargas orgânicas significativamente maiores se comparadas aos filtros anaeróbios com preenchimento convencional (INCE et al 2000).

Performances de meio de vidro sinterizado e meio de cerâmica para filtros anaeróbios foram comparadas (UGURLU and FORSTER, 1991, citados por INCE et al, 2000) e ambos os reatores atingiram uma carga orgânica de 36 kg DQO/m<sup>3</sup>.dia, sem prejuízo do seu desempenho. Entretanto, a estabilidade do vidro sinterizado como meio suporte para filtros anaeróbios sugere que ele seria capaz de tratar cargas orgânicas maiores. Quanto mais biomassa se aderiu, o meio suporte de vidro do filtro apresentava uma maior proporção de biomassa e uma melhor distribuição de bactérias. Outros estudos de adesão em filtros anaeróbios também mostraram grande adesão de bactérias em meio de vidro sinterizado, embora a maior parte da biomassa não aderida fosse retida nos interstícios do meio plástico (BAKER, 1991; ANDERSON et al 1994, citados por INCE et al 2000).

O filtro anaeróbio utilizado no trabalho de Ince et al (2000) possuía diâmetro de 150 mm e comprimento igual a 1000 mm, composto de uma coluna PVC. Pratos plásticos de distribuição de fluxo foram colocados 5 cm acima da porta de entrada do afluente e 5 cm abaixo da saída do afluente do filtro. Ele foi aleatoriamente preenchido com anéis de vidro sinterizado poroso. As características do efluente do laticínio em questão podem ser vistas na Tabela 3.21.

Durante o período de partida o filtro foi alimentado continuamente com efluente diluído com concentração de 1000 mg/L para dar uma carga orgânica volumétrica de 1 kg DQO/ m<sup>3</sup>.d. O tempo de detenção hidráulica foi inicialmente mantido em aproximadamente um dia e após o estabelecimento de uma boa partida, ele foi então reduzido para 12 horas (carga orgânica volumétrica de 5 kg DQO/m<sup>3</sup>.d) e mantido o mesmo nível para o estudo enquanto a carga orgânica volumétrica foi gradualmente aumentada até 21 kg DQO/m<sup>3</sup>.d. No trabalho em questão, o filtro apresentou uma alta estabilidade até uma carga orgânica volumétrica de 13 kg DQO/m<sup>3</sup>.d, até o ponto em que a remoção de DQO permaneceu acima de 80%.

**Tabela 3.21** – Composição química do efluente do laticínio no estudo de Ince

Parâmetro	Concentração (mg/L)
DQO	2000 – 6000
DBO <sub>5</sub>	1200 – 4000
Sólidos suspensos	350 – 950
Alcalinidade (CaCO <sub>3</sub> )	350 – 1000
Óleos e graxas	300 -500

Fonte: adaptado de Ince et al, (2000).

### 3.9 – Análise crítica da literatura e contribuição do presente estudo

A partir dos trabalhos apresentados no item 3.8, pode-se verificar que existem estudos sobre filtro anaeróbio para tratamento de efluentes gerados em indústria de laticínios, cujo foco principal são as avaliações das cargas orgânicas volumétricas aplicadas e os tempos de detenção hidráulica. Estudos mais aprofundados sobre a influência da altura do meio suporte contribuiriam melhorar o conhecimento sobre o funcionamento do filtro anaeróbio, e conseqüentemente aumentar a sua aplicabilidade para esse tipo de tratamento.

Nesse sentido, o presente trabalho pretende avaliar como a altura do meio suporte do filtro anaeróbio afeta o seu desempenho e contribuir para um melhor entendimento sobre a biota presente no seu interior. Ademais, espera-se contribuir para uma maior aplicação dessa tecnologia, subsidiando profissionais especializados em projetos de estações de tratamento de efluentes líquidos de indústria de laticínios, uma vez que a literatura especializada raramente apresenta informações acerca de sistemas operando em escala plena, notadamente nesta modalidade.

A Tabela 3.22 apresenta os principais parâmetros em síntese da revisão bibliográfica objeto deste estudo.

**Tabela 3.22** – Principais parâmetros em síntese da revisão bibliográfica para efluentes de laticínios

Parâmetros	MINAS	LITERATURA
	AMBIENTE	
	Média	Média
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	2169	2.300
DQO (mg/L)	4.010	4.500
Sólidos totais ST (mg/L)	1892	2.500
Óleos e graxas (mg/L)	373	209
Nitrogênio (mg/L)	42	64
Fósforo (como PO <sub>4</sub> ) (mg/L)	9	48
pH	6,9	7,2
Temperatura (°C)	31	35
Carga específica de DBO <sub>5</sub> (kg de DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> de leite)	4	5,8
Tempo de detenção hidráulica para filtro anaeróbio (horas)	102	16
Carga orgânica volumétrica para filtro anaeróbio (kg DQO/m <sup>3</sup> .dia)	0,94	10
Altura do meio suporte para filtro anaeróbio (m)	1,5	-
Eficiência de remoção de DQO para filtro anaeróbio	89	83

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da indústria de laticínios estudada

#### 4.1.1 Preliminares

Apresenta-se a seguir um relato referente à industrialização de produtos lácteos e a geração de águas residuárias da empresa Apreciare Alimentos Ltda.

O empreendimento encontra-se instalado no município de Sete Lagoas – Minas Gerais, produzindo iogurte, queijo “petit-suisse”, manteiga, requeijão cremoso e queijo frescal, com uma capacidade nominal de processamento de 50.000 litros de leite por dia.

O projeto de tratamento de efluentes líquidos industriais elaborado inicialmente contemplava uma vazão superior à encontrada durante as pesquisas. Ações visando à redução da geração de efluentes foram implantadas com sucesso no empreendimento, fazendo com que, desta forma, o sistema de tratamento operasse com bastante folga, conforme se verifica nos itens seguintes.

#### 4.1.2 Produtos fabricados

Os produtos finais a serem obtidos no processamento industrial encontram-se discriminados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Produtos fabricados**

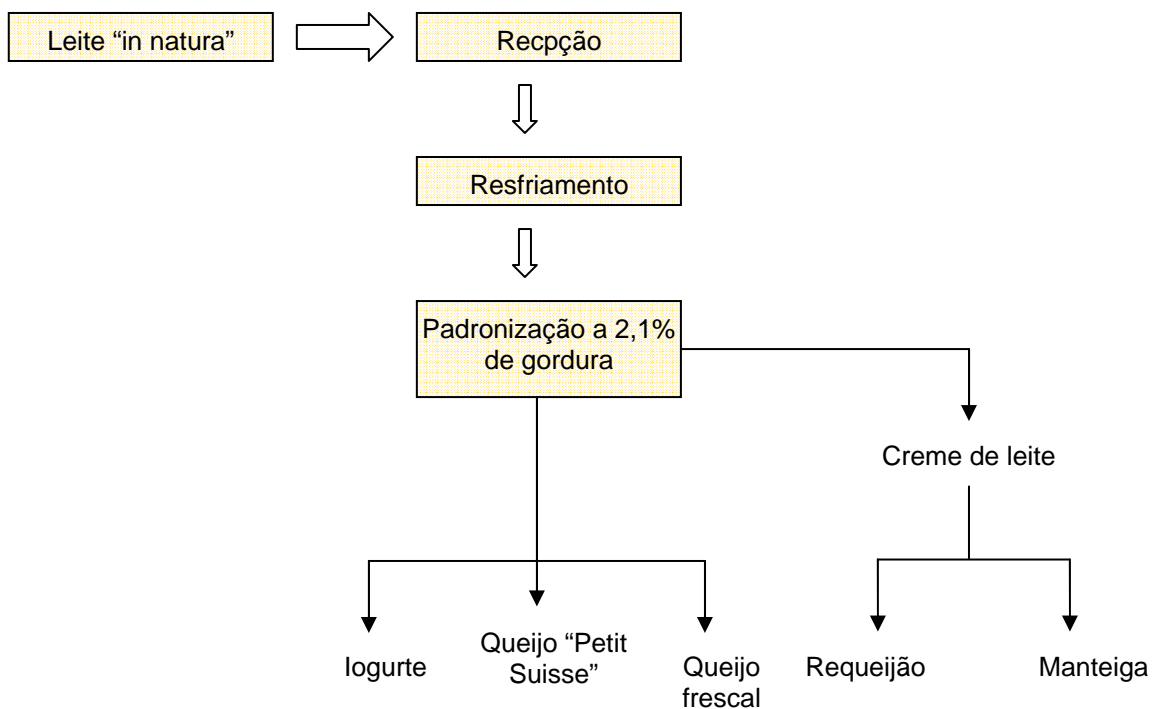
Produto	Unidade	Quantidade
Iogurte/Bebidas lácteas	(kg/d)	47.0000
Petit-suisse	(kg/d)	2.000
Manteiga	(kg/d)	600
Requeijão	(kg/d)	400
Queijo frescal	(kg/d)	1.000

Fonte: Apreciare Alimentos

#### 4.1.3 Descritivo do processamento industrial

Apresenta-se a seguir todo o processamento industrial do empreendimento, com as etapas de fabricação, os principais produtos utilizados, assim como a seqüência de industrialização.

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma geral do processamento industrial.

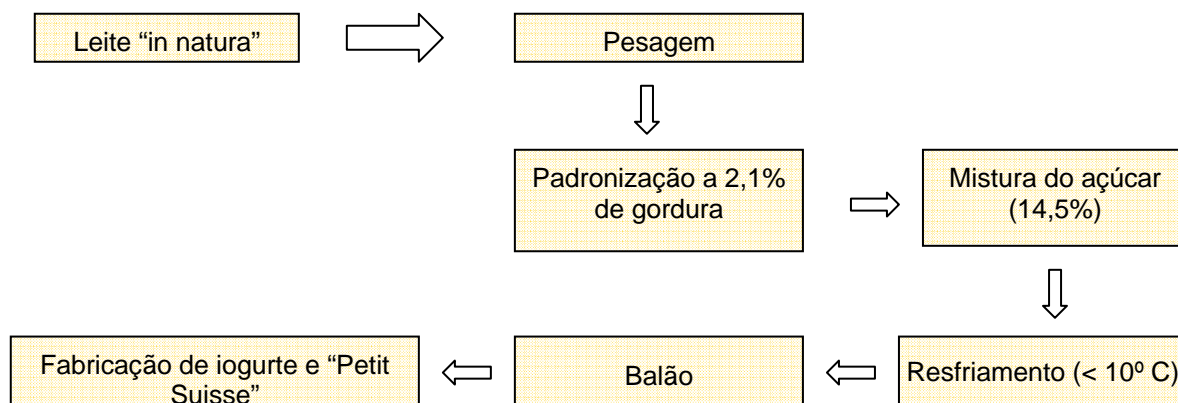


**Figura 4.1** – Fluxograma geral do processamento industrial

#### 4.1.3.1 Recepção/padronização – “Premix”

O leite chega a plataforma de recepção, sendo então pesado e enviado à padronizadora. A padronização deixa o leite com percentual de gordura em torno de 2,1%, teor este necessário para a fabricação dos diversos produtos. Em seguida, o leite é misturado com açúcar (14,5%), sendo o “premix” resfriado e estocado em balão, para utilização na fabricação de iogurte e “petit- suisse”.

A Figura 4.2 apresenta o fluxograma de fabricação do “Premix”

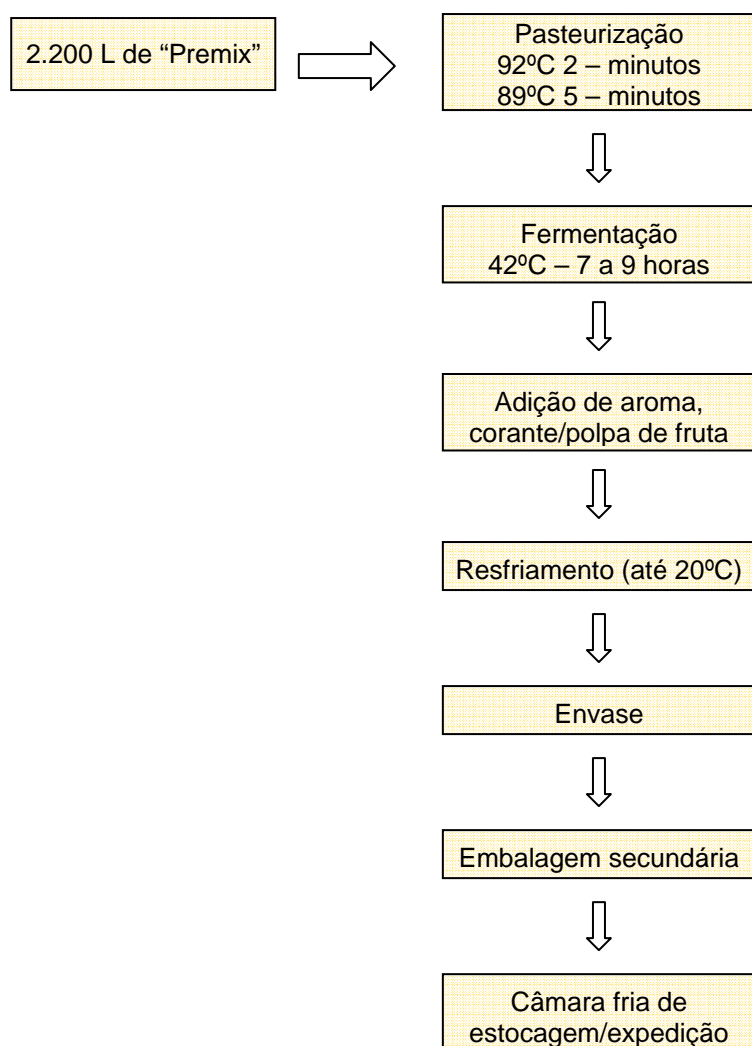


**Figura 4.2** – Fluxograma de fabricação do “Premix”

#### 4.1.3.2 Produção de iogurte

O processo inicia-se com a recepção do “premix” previamente fabricado conforme anteriormente descrito. O “premix” passa, então, pelo pasteurizador, onde será aquecido a 92°C por 2 minutos e, em seguida, a 89°C por 5 minutos. Esta operação tem a finalidade de destruir as bactérias patogênicas e dar segurança quanto à qualidade do leite. Após esta etapa, o produto é enviado à fermenteira, onde é feita a fermentação a 42°C, por um período de 7 a 9 horas. Em seguida, adiciona-se o aroma, o corante e a polpa de fruta. Resfria-se o produto, sendo o mesmo envasado, selado e conduzido à câmara frigorífica de estocagem e expedição.

A Figura 4.3 apresenta o fluxograma de fabricação do iogurte.

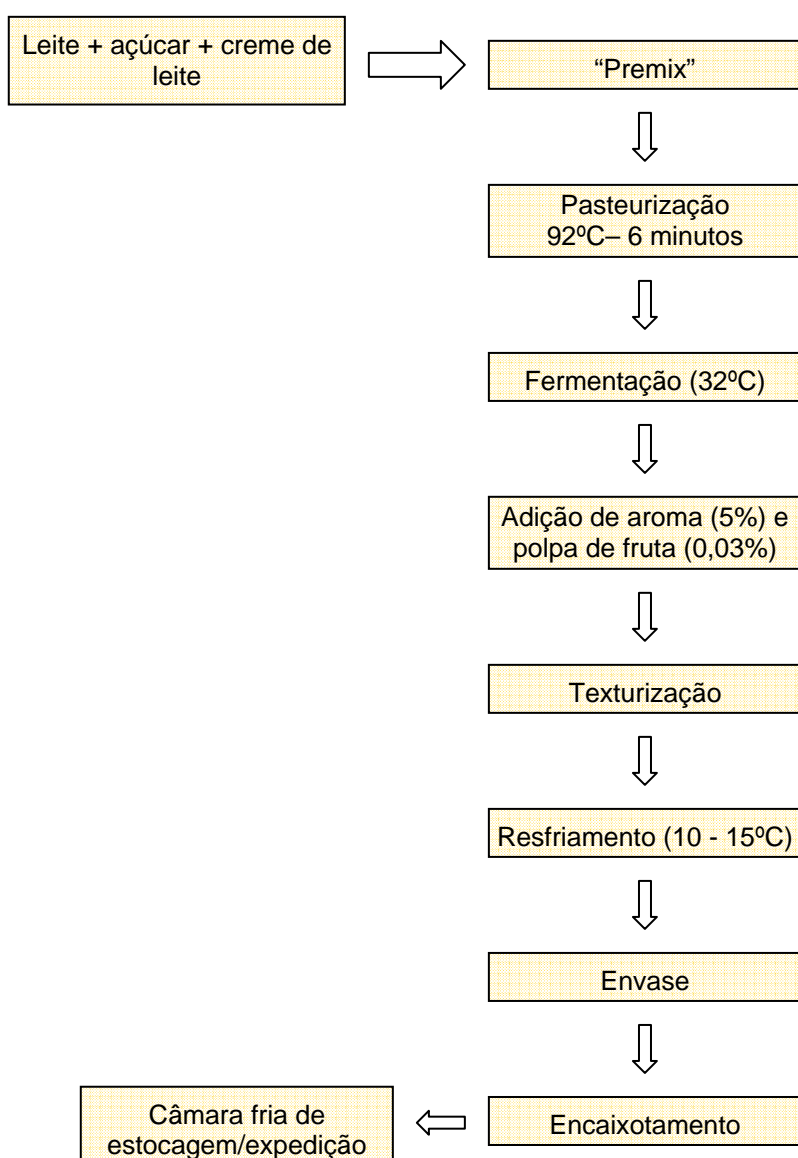


**Figura 4.3** – Fluxograma de fabricação do iogurte

#### 4.1.3.3 Produção de “petit – suisse”.

O processo inicia-se com a recepção do leite, do açúcar, da proteína e do creme de leite, que, juntamente com o “premix”, vão ser levados ao pasteurizador, onde serão aquecidos a 92°C por 6 minutos. Após esta etapa, o produto é enviado à fermenteira, onde é feita a fermentação a 32°C. Em seguida, adiciona-se a polpa (5%) e o aroma, promove-se a texturização, até se obter a textura homogênea e resfria-se até 10-15°C. O produto é, então, envasado, encaixotado e conduzido à câmara fria de estocagem e expedição.

A Figura 4.4 apresenta o fluxograma de fabricação do “petit suisse”



**Figura 4.4** – Fluxograma de fabricação do “petit suisse”

#### 4.1.3.4 Produção de manteiga

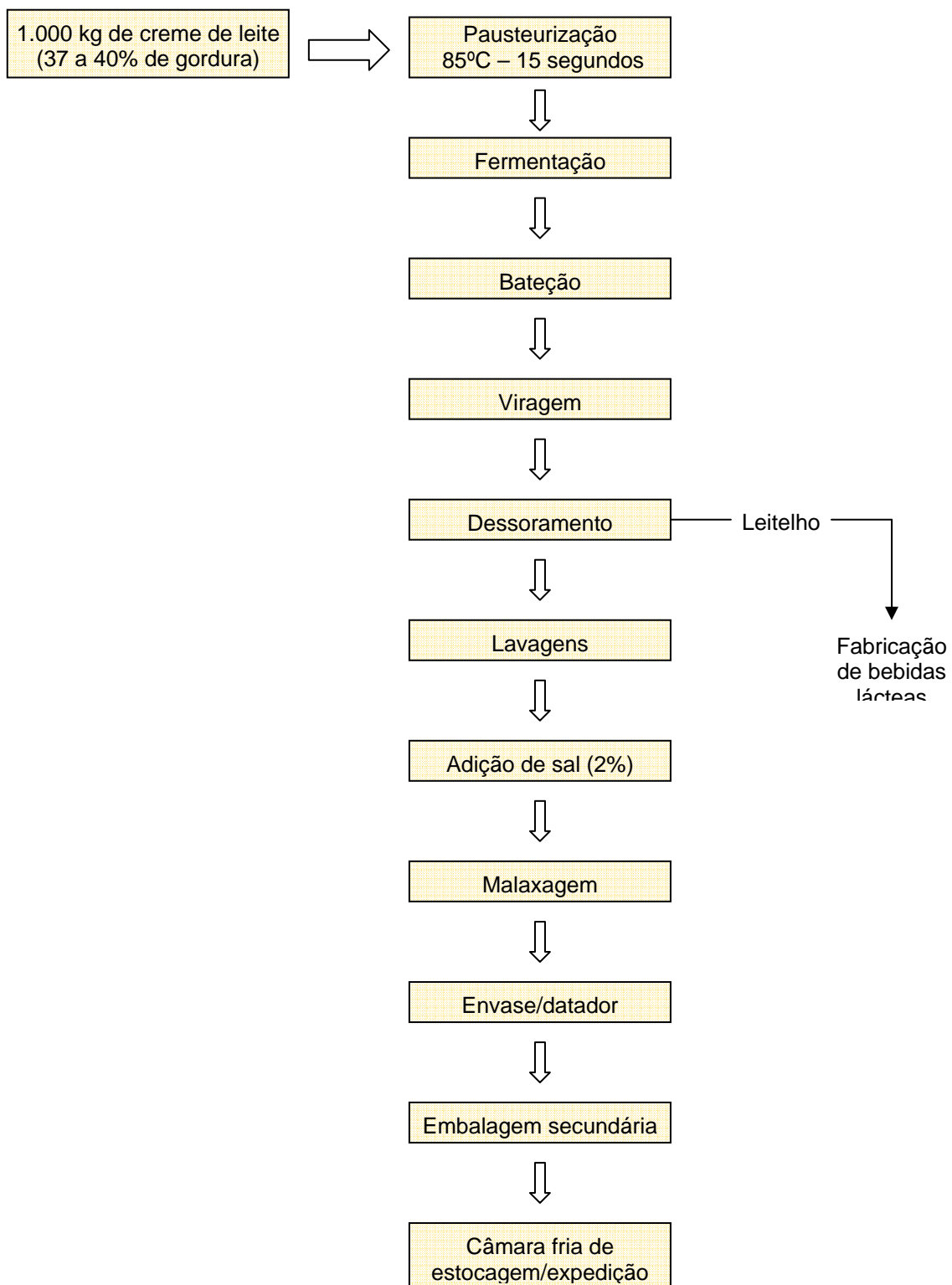
A matéria-prima – creme de leite (1.000 kg, 37 a 40% de gordura) é levada ao pasteurizador, onde é aquecida a 85°C por 15 segundos. Em seguida, é realizada a fermentação e a batadura do creme, que é feita por tombos, na batedeira. O creme é uma emulsão de gordura em água (glóbulos de gordura em suspensão no líquido). Com a batadura, eles vão se unindo, fixando uns aos outros pelas partes líquidas que são liberadas dos glóbulos (torna-se uma emulsão de gordura e água).

Após a batadura do creme, faz-se o dessoramento, sendo o leiteiro reaproveitado na fabricação de bebidas lácteas. Em seguida são realizadas diversas lavagens para posteriormente ser adicionado o sal (2%).

Após esta etapa, realiza-se a malaxagem, que consiste na espremedura da manteiga, visando retirar o excesso de água, bem como promover a sua homogeneização. O teor de água não deve ser superior a 17-18%.

Após a fabricação, o produto é envasado, datado e selado, sendo enviado à embalagem secundária e conduzido à câmara fria de estocagem e expedição.

A Figura 4.5 apresenta o fluxograma de fabricação da manteiga.



**Figura 4.5** – Fluxograma da fabricação de manteiga

#### 4.1.3.5 Produção de requeijão cremoso

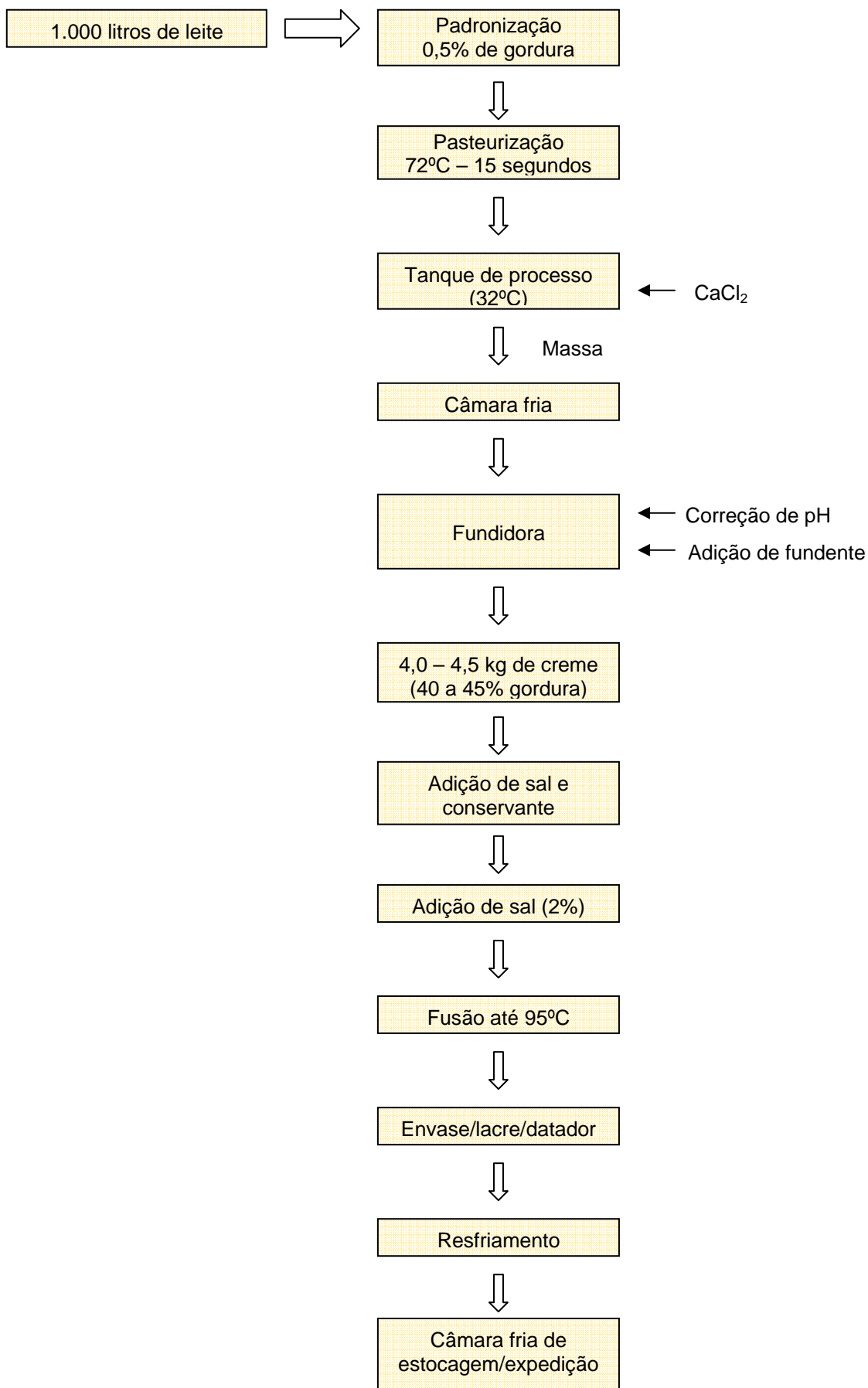
Inicia-se o processo de obtenção da massa para a fabricação de requeijão, com a recepção do leite e sua padronização até 0,5% de gordura. Em seguida, realiza-se a pasteurização a 72°C por 15 segundos. O produto é, então, enviado ao tanque de processo, onde será aquecido a 32–45°C, sendo adicionado  $\text{CaCl}_2$  (para restituir o cálcio perdido na pasteurização), controlador de pH, realizando-se, também, diversas lavagens a fim de se retirar a maior parte da lactose que ainda se encontra presente e eliminar o excesso de ácido láctico formado. Obtida a massa, esta é moldada estando pronta para seguir o processo.

A massa, após correção do pH, é enviada ao tacho de fundição, sendo acrescentado o fundente. Adiciona-se também creme de leite (40 a 45% de gordura), sal e conservante, sendo que o requeijão cremoso estará pronto quando a temperatura atingir 95°C.

O produto obtido é então envasado, lacrado e, logo após, colocado num tanque contendo água gelada. Após 15 minutos, o produto envasado é datado, selado e armazenado em câmara fria para posterior expedição.

Salienta-se que não há descarte de soro ou leiteiro no empreendimento, havendo a incorporação desses produtos nos derivados lácteos produzidos e que o empreendimento opera tanto recebendo “leite in natura” a granel na plataforma de recepção, como recebendo leite em pó.

A Figura 4.6 apresenta o fluxograma de fabricação do requeijão cremoso



**Figura 4.6** – Fluxograma da fabricação de requeijão cremoso

#### 4.1.4 Utilização da água

##### 4.1.4.1 Fontes de abastecimento

A água utilizada no empreendimento é proveniente de um poço tubular profundo com vazão de 30 m<sup>3</sup>/h.

##### 4.1.4.2 Armazenamento e usos

A capacidade de armazenamento de água do empreendimento encontra-se discriminada na Tabela 4.2 a seguir.

**Tabela 4.2** – Capacidade de armazenamento

Reservatório	Capacidade	Quantidade
Reservatório em concreto	100.000 litros	01
Reservatório metálico suspenso	30.000 litros	01

Fonte: Apreciare Alimentos

A água é bombeada do poço para estes reservatórios e distribuída através de tubulações para toda a indústria, onde é utilizada na limpeza e higienização das instalações e equipamentos de processo. A água também é utilizada para abastecimento dos 100 funcionários existentes.

O consumo médio diário estimado para o empreendimento é de 75.000 litros por dia e é apresentado na Figura 4.7, sendo que toda água utilizada irá se transformar em efluente líquido, uma vez que não há incorporação desta nos produtos fabricados.

Diante desta constatação pode-se afirmar que para o empreendimento em questão a produção média de efluentes em função do volume de leite processado é de 1,5, o que é considerado uma das menores taxas de geração de efluentes comparado a outros laticínios no Brasil e no mundo, conforme verificado anteriormente.

#### 4.1.4.3 Balanço hídrico

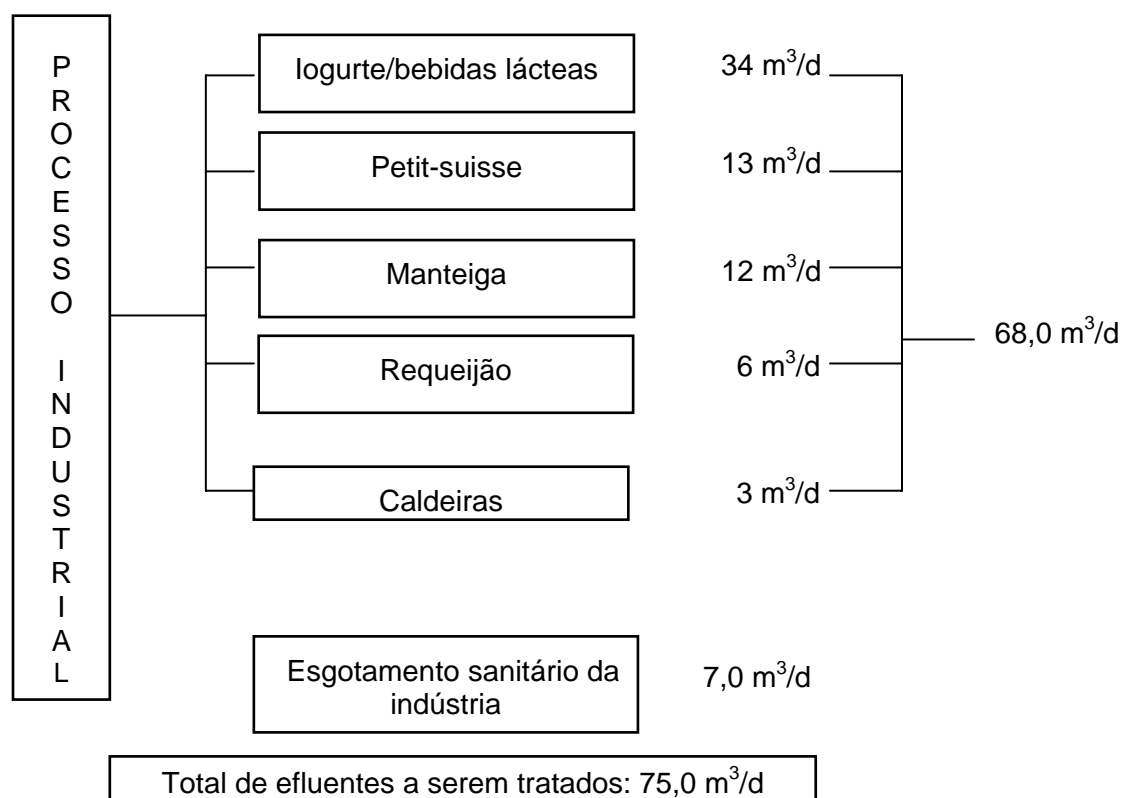


Figura 4.7 – Fluxograma do balanço hídrico

## 4.2 Caracterização dos despejos líquidos

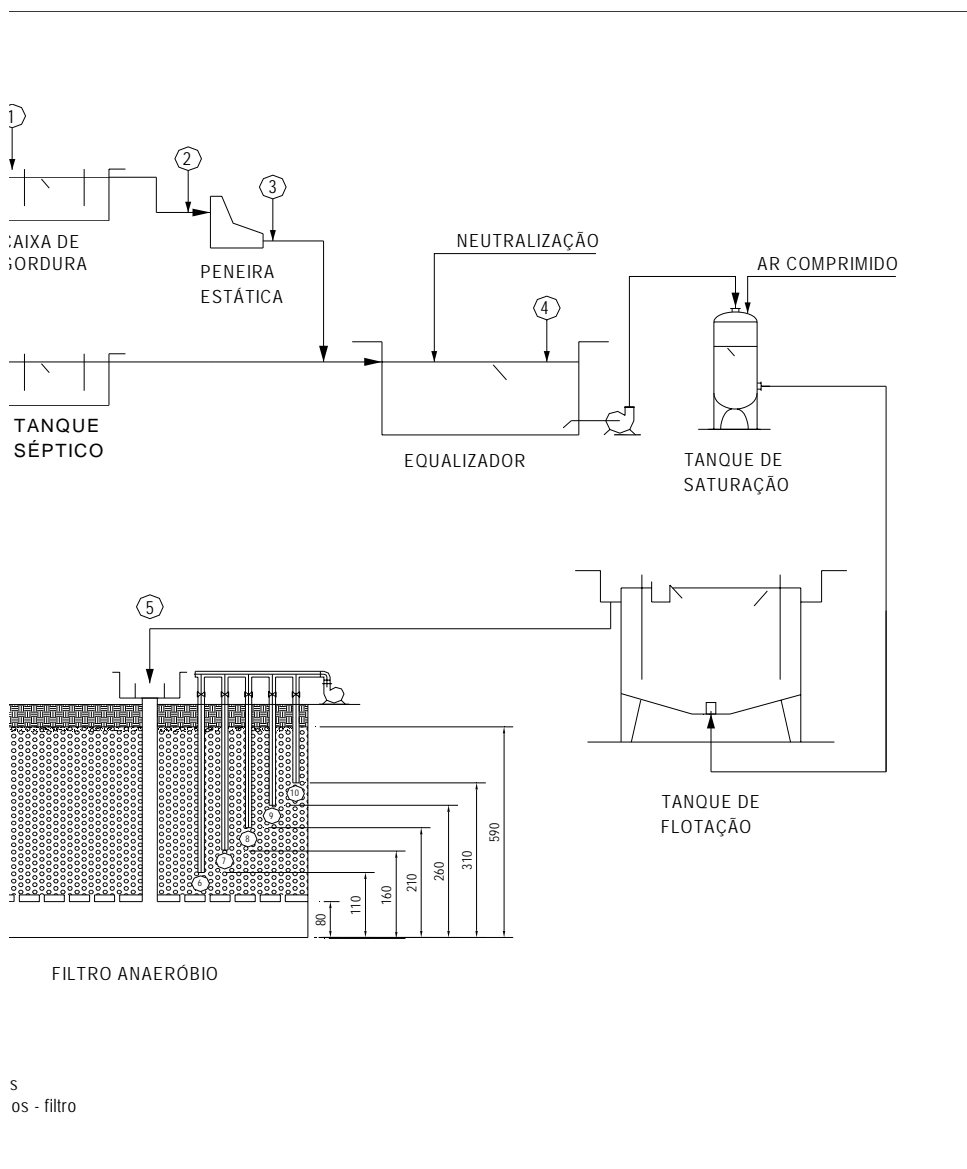
Os despejos líquidos industriais são originados nos diversos setores do processo produtivo, recebendo as seguintes contribuições:

- Lavagem e limpeza de tubulações, tanques de processo, pasteurizador, pisos e demais equipamentos envolvidos direta ou indiretamente no processo produtivo;
- Derrames devido a falhas de operação ou equipamentos em manutenção;
- Perdas no processo, durante a operação de equipamentos;
- Descartes de subprodutos ou produtos rejeitados;

- Soluções usadas na limpeza dos equipamentos e pisos, tais como os detergentes neutros, alcalinos, ácidos e ainda os desinfetantes;
- Vazamentos de lubrificantes dos equipamentos, tais como óleo dos redutores e dos compressores de refrigeração;
- Purgas do sistema de geração de vapor, descargas de fundo e condensados da rede de vapor.

### 4.3 Descrição da estação de tratamento de efluentes

A seguir descreve-se os processos de tratamento, bem como o fluxograma do sistema, ilustrados na Figura 4.8.



**Figura 4.8** – Fluxograma do tratamento de efluentes e os respectivos pontos de amostragem.

Todo o efluente líquido gerado durante o processo industrial é conduzido em rede de escoamento individual até a estação de tratamento de efluentes.

Na primeira fase (tratamento primário) são utilizados somente mecanismos físicos de remoção de sólidos e gorduras. O efluente industrial bruto passa por uma caixa de retenção de gordura e areia (Figura 4.9). Nesta fase, parte da gordura e partículas sólidas grosseiras são removidas. As coletas das amostras para análises de efluente bruto foram feitas à montante da caixa de gordura.

Em seguida o efluente é conduzido a uma peneira estática de aço inoxidável, malha trapezoidal com abertura de 0,5 mm, que impede que partículas sólidas superiores a esta medida ingressem na ETE (Figura 4.10). Daí segue para um tanque equalizador de vazão, com capacidade de armazenamento de 100 m<sup>3</sup> (Figura 4.11).

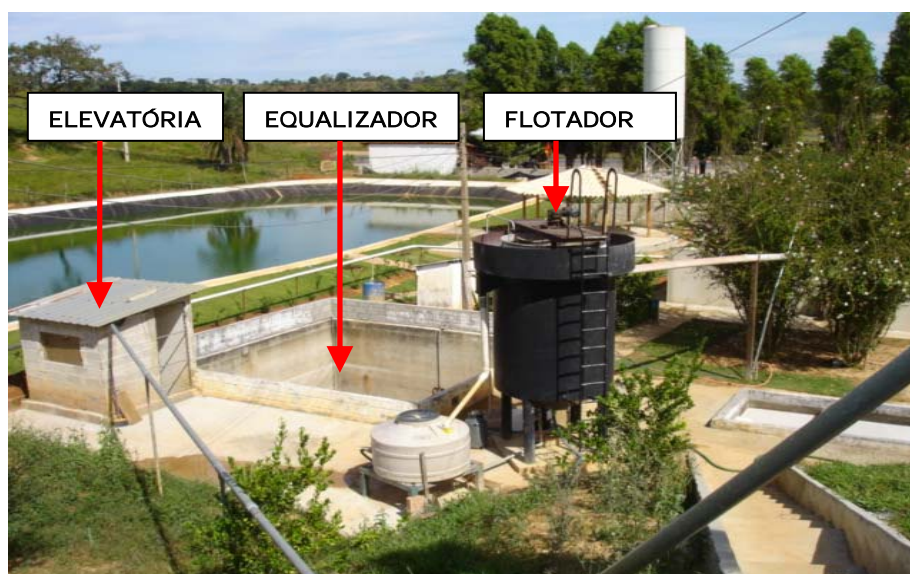
A Figura 4.11 apresenta ainda uma vista parcial da ETE, destacando a estação elevatória, composta de dois conjuntos moto bombas centrífugas de rotor semi aberto e potência de 7,5 CV cada, sendo que um conjunto permanece desligado.



**Figura 4.9** – Caixa de gordura



**Figura 4.10** – Peneira estática



**Figura 4.11** – Elevatória, equalizador e flotador

Após equalizada a vazão, o efluente é neutralizado com solução de NaOH e recalcado por um conjunto moto-bomba centrífuga, por 12 (doze) horas, ao sistema de flotação, composto de câmara de saturação, compressor de ar, painel pneumático de redução de pressão e controle de vazão e flotador com raspador de sobrenadante, sendo este encaminhado a um reservatório de gordura. Nesta etapa são removidas grandes quantidades de sólidos grosseiros, gorduras e sólidos em suspensão, preparando o fluxo de efluentes para a etapa seguinte do processo (Figura 4.11).

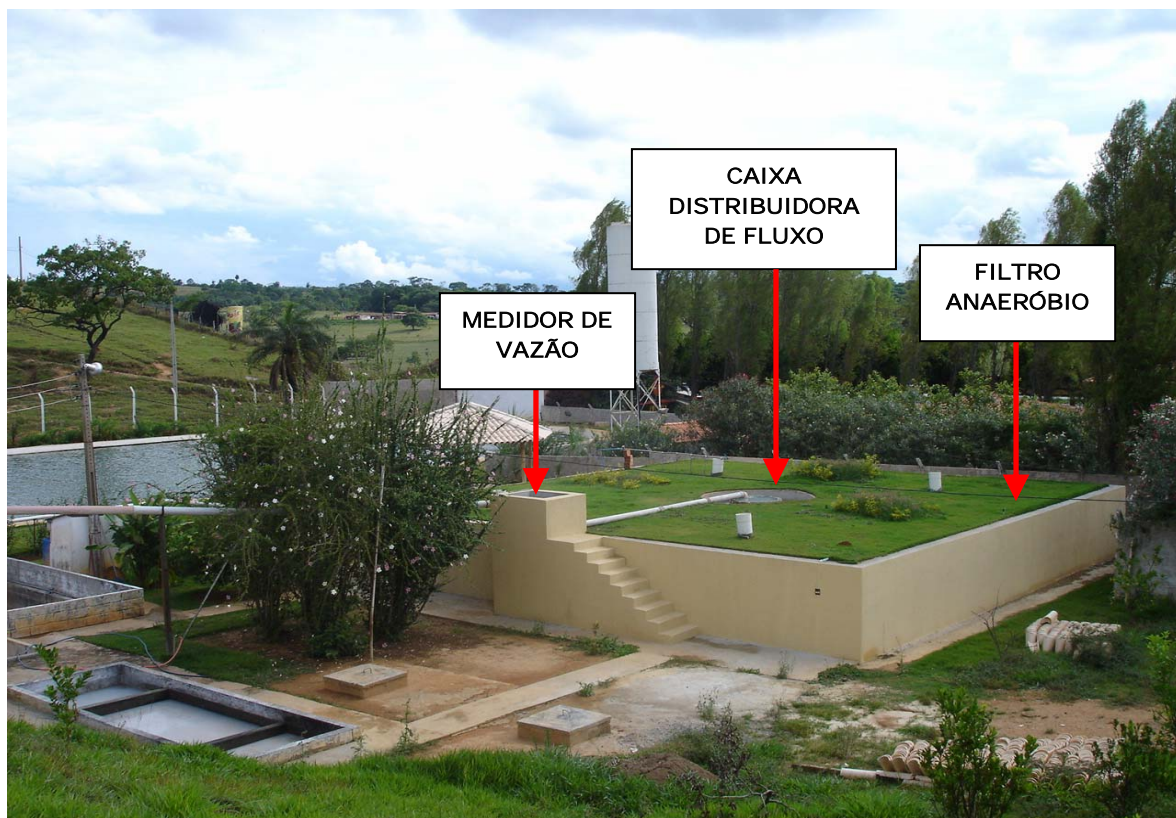
O efluente, após passar pelo tratamento primário, é conduzido, por escoamento, até o filtro anaeróbio, sendo que seu ingresso se faz por meio de um medidor de vazão triangular tipo “Thompson”. Em seguida é encaminhado a um distribuidor de fluxo, localizado na parte superior do filtro, capaz de conduzir o efluente até o fundo do reator (fundo falso) em 16 pontos distintos, uniformemente distribuídos através de tubos de PVC com diâmetro de 75 mm (Figura 4.12).

Sobre o fundo falso, existe uma camada de 5,10 m de brita nº 4 de escória de alto forno, formando o meio suporte do filtro, e sobre este, tubos perfurados que coletam e direcionam o efluente a um ponto de lançamento, provocando desta forma um fluxo ascendente do efluente.



**Figura 4.12** – Caixa de distribuição de fluxo

Como cuidado especial de construção, devido à proximidade do reator com um restaurante em funcionamento, foi previsto, com o objetivo de controlar e minimizar a emissão de gás sulfídrico ( $H_2S$ ), o lançamento de 50 cm de terra sobre os tubos coletores, devidamente protegidos por um tecido de poliéster (geotêxtil) e o plantio de grama e espécies ornamentais de paisagismo, como pode ser visto na Figura 4.13.



**Figura 4.13** – Vista do filtro anaeróbico

As principais características dos elementos que compõem a estação de tratamento de esgotos do empreendimento são apresentadas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 - Características das unidades que compõem o tratamento primário**

Unidade	Características
Caixa de gordura	Comprimento: 3,0m Largura: 1,5m Profundidade: 1,2m
Peneira estática	Vazão: 40 m <sup>3</sup> /hora Abertura da malha: 0,5 mm Material construtivo: aço inoxidável AISI 304
Equalizador	Comprimento: 6,8m Largura: 6,8m Profundidade útil: 2,5m
Câmara de saturação	Diâmetro: 1,0m Altura: 1,32m Volume: 1,0 m <sup>3</sup> Pressão de trabalho: 4 a 7 kgf/cm <sup>2</sup>
Flotador	Diâmetro: 2,35m Altura útil: 2,7m Volume útil: 11,72 m <sup>3</sup>
Medidor de vazão	Tipo: Medidor Thompson Vazão máxima: 10,0 l/s
Caixa de distribuição de fluxo	Diâmetro: 1,8m Altura: 0,6m
Tanque séptico	Comprimento: 6,0m Largura: 2,0m Profundidade: 3,5m

As características principais do filtro anaeróbio são apresentadas na Tabela 4.4

**Tabela 4.4 - Características principais do filtro anaeróbio**

Características	Filtro anaeróbio		
	Compartmento de lodo (fundo falso)	Meio suporte	Total
Material	-	Brita de escória de alto forno nº 4	-
Seção (m)	13 x 13	13 x 13	-
Altura (m)	0,80m	5,10m	5,90m
Volume útil (L)	135,20m <sup>3</sup>	861,90m <sup>3</sup>	997,10m <sup>3</sup>
Pontos de amostragem	1	5	6

#### 4.3.1 Adaptações necessárias na ETE

Para as avaliações propostas no presente estudo, foram adaptados alguns dispositivos na ETE, a saber:

- No filtro anaeróbio, foram introduzidos 5 (cinco) amostradores compostos de tubos galvanizados Ø ½”, no interior do meio suporte, em profundidades variando de 0,90m até 2,90m em relação ao fundo do filtro, a fim de possibilitar a tomada de amostras de lodo ao longo da coluna (Figuras 4.8 e 4.14).

- Foram utilizados amostradores do tipo "bomba de vácuo" capazes de coletar amostras de lodo desde o fundo até a parte superior do filtro, sendo estas coletadas a cada 50 cm de distância umas das outras, bem como efluentes na entrada (após passar por tratamento primário - flotação) e saída do filtro anaeróbio.

A figura 4.14 apresenta os tubos coletores de amostras na parte superior do filtro anaeróbio.



**Figura 4.14** – Vista dos tubos coletores ao longo da altura do filtro

#### 4.4 Condições operacionais do filtro

A Tabela 4.5 lista os principais parâmetros e a frequência de amostragem.

**Tabela 4.5** – Condições operacionais do filtro anaeróbio

Principais variáveis	Pontos de amostragem					
	6	7	8	9	10	11
Vazão equalizada (industrial e sanitário) (m <sup>3</sup> /dia)	75	75	75	75	75	75
Altura (fundo falso + meio suporte) (m)	0,90	1,40	1,90	2,40	2,90	5,90
Volume acumulado (m <sup>3</sup> )	152,1	236,6	321,1	405,6	490,1	997,1
Tempo de detenção hidráulica - TDH (h) *	49	76	103	130	157	319
Carga orgânica volumétrica - COV (kg DQO/m <sup>3</sup> .d)*	0,97	0,63	0,46	0,37	0,30	0,15

\* Não foram considerados os índices de vazios de vazios provocados pelo material filtrante (brita de escória nº4), correspondente a aproximadamente 50%.

Pontos de amostragem:

6- À 90 cm do fundo do filtro

9- À 240 cm do fundo do filtro

7- À 140 cm do fundo do filtro

10- À 290 cm do fundo do filtro

8- À 190 cm do fundo do filtro

11- Efluente final

## 4.5 Programa de monitoramento

A Tabela 4.6 lista os principais parâmetros e a frequência de amostragem

**Tabela 4.6 - Universo de amostragem**

Parâmetro	Frequência	Nº de Análises	Pontos de amostragem											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Vazão	Semanal	104					X							
SST	Semanal	196	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
STV	Semanal	196	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DQO <sub>f</sub>	Quinzenal	202	X	X	X	X	X							X
DQO <sub>t</sub>	Quinzenal	326	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Alcalinidade total	Quinzenal	42				X	X							X
Óleos e graxas	Quinzenal	75	X	X		X	X							X
AGV	Semanal	252					X	X	X	X	X	X	X	X

Convenção:

AGV - Ácidos graxos voláteis

SST - Sólidos suspensos totais

DQO<sub>f</sub> - Demanda química de oxigênio filtrada

STV - Sólidos totais voláteis

DQO<sub>t</sub> - Demanda química de oxigênio total

Pontos de amostragem:

1- Efluente bruto

7- À 140 cm do fundo do filtro

2- Após a caixa de gordura

8- À 190 cm do fundo do filtro

3- Após a peneira estática

9- À 240 cm do fundo do filtro

4- Equalizador

10- À 290 cm do fundo do filtro

5- Após o flotador

11- Efluente final

6- À 90 cm do fundo do filtro

Os parâmetros pH e temperatura foram também monitorados, porém não sofreram variações significativas e desta forma não foram apresentados no presente estudo.

## 4.6 Planejamento dos experimentos

Foi realizado, inicialmente, um planejamento dos experimentos para o desenvolvimento de estudos que possibilitassem um melhor entendimento do efeito da altura do meio suporte na eficiência do filtro anaeróbio.

O sistema de tratamento foi avaliado em duas etapas. Na primeira etapa avaliaram-se os parâmetros: DQO<sub>f</sub>, DQO<sub>t</sub>, série de sólidos, óleos e graxas e alcalinidade. Na segunda etapa, além dos parâmetros anteriores incluíram-se os ácidos graxos voláteis.

- Etapa 1: no período de dezembro de 2004 a junho de 2005, dias operacionais 1 a 183.
- Etapa 2: no período de junho a novembro de 2005 (dias operacionais 190 a 354).

Esse incremento de parâmetros ocorreu devido à necessidade de se conhecer a capacidade do filtro de remover a matéria orgânica ao longo da coluna de meio suporte, uma vez que os

resultados obtidos até a etapa 1 demonstraram que a degradação do efluente estava ocorrendo sucessivamente nos pontos amostrados no interior do filtro (pontos 6 ao 11).

A Tabela 4.7 resume cada fase, com seu respectivo período operacional.

**Tabela 4.7 - Resumo das etapas com seu respectivo período operacional**

Sistema	Etapas	Período operacional	Total de dias
Filtro anaeróbio	1	06/dezembro/2004 a 07/junho/2005	183
	2	14/junho/2005 a 25/novembro/2005	171

A programação dos experimentos foi realizada de maneira a se estudar, em escala real, o filtro anaeróbio funcionando de maneira plena, verificando as eficiências de remoção de DQO ocorridas em função das diversas profundidades do meio suporte.

Durante a pesquisa, o programa de monitoramento foi planejado de forma a se avaliar:

- Eficiência do filtro anaeróbio: com a realização de análises de DQO, série de sólidos, óleos e graxas;
- Estabilidade do processo de digestão anaeróbia: com a amostragem em diferentes alturas ao longo do filtro anaeróbio para a realização de análises de DQO, ácidos graxos voláteis, assim como a alcalinidade no afluente e efluente do sistema.

Para o efluente bruto (ponto 1), após passar pela caixa de gordura (ponto 2) e após a peneira estática (ponto 3) as amostras foram coletadas de forma composta, com intervalo de uma hora, durante o período de 8:00 às 17:00 horas. Para os demais pontos as amostras foram coletadas em uma única vez às 17:00 horas. As análises de DBO<sub>5</sub>, DQO, série de sólidos, óleos e graxas e alcalinidade, seguiram as normas preconizadas pelo *Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th edition*.

Para as análises de ácidos graxos voláteis foram adotados os seguintes procedimentos:

- Extração

A análise foi realizada em duas etapas. A primeira consistiu na extração de AGV propriamente dito. Para extração, uma alíquota de 15 mL da amostra filtrada em membrana de 1,2 µm foi transferida para um tubo de ensaio contendo, aproximadamente, 5g de NaCl.

Adicionou-se 0,4 mL de solução de ácido sulfúrico 1,0 M para acidificar a amostra. O solvente utilizado, adicionado em capela, para separar a fração orgânica foi o MTBE (trimetiletilbenzeno) em volume de 2 mL. Os tubos foram, então, incubados em ultra-som para consolidar a separação das partes polar e apolar e, em seguida, extraiu-se o material sobrenadante contendo AGVs em vials de vidro. Estas alíquotas foram armazenadas em freezer a temperaturas baixo de 0°C pra posterior análise cromatográfica.

- **Análise Cromatográfica**

Através da injeção, deste material extraído, em cromatografia gasosa, obtém-se as quantidades relativas a cada AGV. Estes resultados foram gerenciados pelo software Turbocrome Navigator, que processa, através das informações geradas, um cromatograma apontando a existência ou não de cada AGV. Alguns dos AGV's são listados à seguir: Formiato, Acetato, Propionato, Isobutirato, Butirato, Isovalerato, Valerato. Podem ser observados picos nos cromatogramas, e a área sobre cada pico é relacionada à um determinado AGV. Através de uma curva de calibração previamente construída a partir da injeção de uma solução, de concentrações conhecidas, de cada composto, geraram-se picos com determinadas áreas. Estas foram correlacionadas com as áreas obtidas nos cromatogramas, obtendo-se assim as concentrações de cada AGV de uma determinada amostra.

Para as análises cromatográficas foi utilizado o cromatógrafo PERKIN ELMER XL GL, equipado com detector de ionização de chama (FID), com as seguintes características:

- Coluna de vidro empacotada do tipo Carbowax GP 20%
- Gás de arraste: Nitrogênio ultra puro.
- Volume de injeção no cromatógrafo: 5µL

Foram elaborados, inicialmente, tabelas e gráficos utilizando o programa Microsoft® Excel que permitiu a elaboração dos gráficos tipo Box-Whisker, os quais apresentam as características de um conjunto de dados, como: dispersão, simetria ou assimetria e observação de dados discrepantes com valores de máximo e mínimo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise preliminar dos resultados

Os dados estatísticos básicos obtidos para os resultados de DQO total, DQO filtrada, óleos e graxas, sólidos suspensos totais, sólidos totais e ácidos graxos voláteis são apresentados na Tabela 5.1, enquanto que os dados estatísticos referentes à eficiência global de remoção de DQO do sistema são apresentadas na Tabela 5.2.

**Tabela 5.1 - Dados estatísticos básicos da análise preliminar**

Parâmetro	Estatística	Pontos de amostragem										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DQO <sub>t</sub> (mg/L)	Nº de dados	30	30	30	30	41	-	-	-	-	-	41
	<b>Média</b>	<b>2030</b>	<b>2292</b>	<b>2200</b>	<b>2008</b>	<b>1951</b>	-	-	-	-	-	<b>80</b>
	Mínimo	859	568	860	240	823	-	-	-	-	-	3
	Máximo	4667	5057	4869	3499	1675	-	-	-	-	-	435
	DP	1057	950	915	686	1188	-	-	-	-	-	82
DQO <sub>f</sub> (mg/L)	Nº de dados	31	31	31	31	41	-	-	-	-	-	41
	<b>Média</b>	<b>1155</b>	<b>1428</b>	<b>1413</b>	<b>1239</b>	<b>1159</b>	-	-	-	-	-	<b>32</b>
	Mínimo	369	65	120	69	62	-	-	-	-	-	1
	Máximo	3013	4087	3867	2336	2926	-	-	-	-	-	142
	DP	658	750	746	426	554	-	-	-	-	-	28
DQO <sub>f</sub> - FA (mg/L)	Nº de dados	-	-	-	-	-	24	24	24	24	24	41
	<b>Média</b>	-	-	-	-	-	<b>656</b>	<b>89</b>	<b>50</b>	<b>99</b>	<b>47</b>	<b>32</b>
	Mínimo	-	-	-	-	-	37	7	5	3	9	1
	Máximo	-	-	-	-	-	1214	470	213	637	148	142
	DP	-	-	-	-	-	300	115	45	126	32	30
Óleos e graxas (mg/L)	Nº de dados	15	15	-	15	15	-	-	-	-	-	15
	<b>Média</b>	<b>116</b>	<b>127</b>	-	<b>120</b>	<b>64</b>	-	-	-	-	-	<b>7</b>
	Mínimo	41	67	-	22	5	-	-	-	-	-	1
	Máximo	358	251	-	670	234	-	-	-	-	-	20
	DP	84	56	-	157	71	-	-	-	-	-	6
Sólidos suspensos totais (mg/L)	Nº de dados	30	30	30	30	38	-	-	-	-	-	38
	<b>Média</b>	<b>301</b>	<b>414</b>	<b>413</b>	<b>327</b>	<b>232</b>	-	-	-	-	-	<b>44</b>
	Mínimo	88	150	128	137	32	-	-	-	-	-	18
	Máximo	722	2241	2270	640	840	-	-	-	-	-	75
	DP	13	151	369	377	133	-	-	-	-	-	150

Pontos de amostragem:

- |                               |                                 |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 1- Efluente bruto             | 7- À 140 cm do fundo do filtro  |
| 2- Após a caixa de gordura    | 8- À 190 cm do fundo do filtro  |
| 3- Após a peneira estática    | 9- À 240 cm do fundo do filtro  |
| 4- Equalizador                | 10- À 290 cm do fundo do filtro |
| 5- Após o flotador            | 11- Efluente final              |
| 6- À 90 cm do fundo do filtro |                                 |

### 5.1.1 Demanda química de oxigênio total, DQO<sub>t</sub>

Observa-se que para o parâmetro DQO no efluente final (ponto 11) a média das concentrações ficou em 80 mgDQO.L<sup>-1</sup> (ver Tabela 5.1 e Figura 5.1) e que a eficiência média de remoção global foi de 95% (ver Tabela 5.2 e Figura 5.4). Esses valores se mantiveram abaixo do rigoroso padrão de lançamento atual de 90 mgDQO.L<sup>-1</sup> e 150 mgDQO.L<sup>-1</sup> futuro, ou 90% de eficiência (DN 010/86 COPAM).

**Tabela 5.2** - Dados estatísticos básicos da eficiência global do sistema

Eficiência global (Ponto 11) em %													
Nº DADOS	Estatística			Médias			Varição	Percentis					
	MÉD.	MÍN.	MÁX.	COEF. VAR.	MÉD.	MEDIANA	DP	10%	25%	50%	75%	90%	
30	95	65	100	0,07	95	96,3	95,1	6,25	93,7	95,2	96,3	98,3	98,9

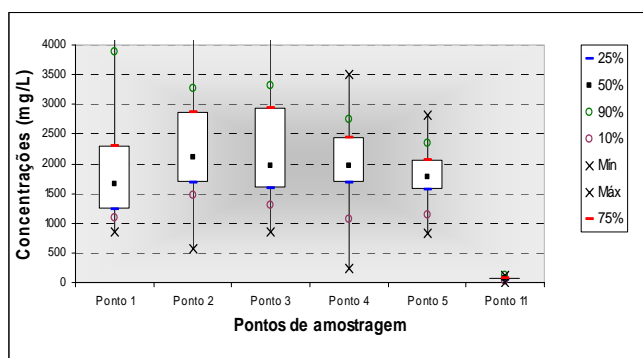
A Figura 5.1 apresenta as concentrações de DQO<sub>t</sub> em função dos pontos de amostragem, quais sejam: ponto 1 – efluente bruto, ponto 2 – após passar pela caixa de remoção de gordura, ponto 3 – após passar pela peneira estática, ponto 4 – efluente equalizado (introdução de esgoto sanitário), ponto 5 – após a flotação e ponto 11 – efluente final.

Observa-se pouca variação da concentração de DQO<sub>t</sub> no tratamento primário (ponto 1 ao 5) e um acentuado decréscimo após passar pelo tratamento biológico (filtro anaeróbio).

A Figura 5.2 mostra a evolução das concentrações de DQO total do efluente equalizado (ponto 4), após passar pelo sistema de flotação (entrada do filtro – ponto 5), saída do filtro (ponto 11) e limite imposto pela DN 10/86 – FEAM-COPAM.

O comportamento do sistema em relação ao parâmetro DQO mostrou-se bastante eficiente, sendo capaz de produzir um efluente final com concentrações abaixo de 90 mgDQO/L, exceto para os dois primeiros resultados e, portanto, atendendo ao rigoroso padrão de lançamento estabelecido pela legislação ambiental vigente no Estado de Minas Gerais.

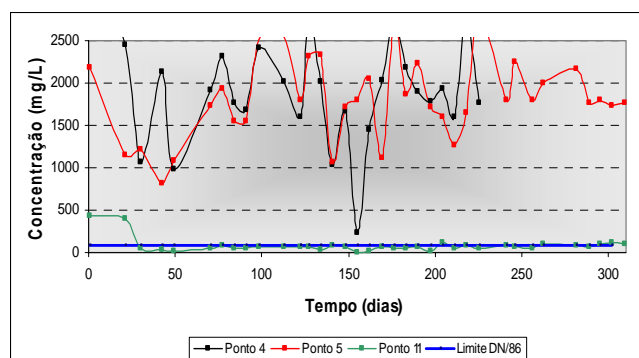
A série temporal da eficiência global do sistema, assim com os percentis de atendimento à legislação em relação às concentrações de DQO<sub>t</sub> são apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4, respectivamente.



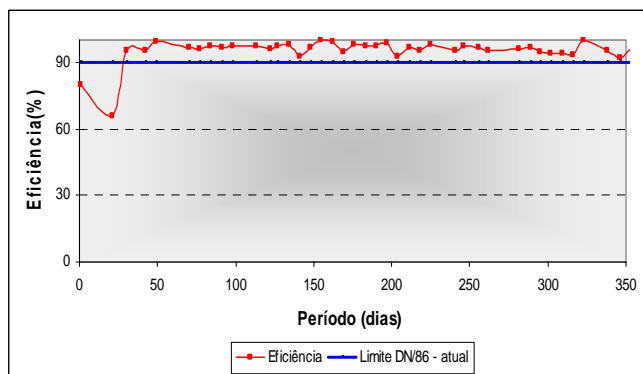
**Figura 5.1** – Perfil das concentrações de  $DQO_t$  em função dos pontos de amostragem

Pontos de amostragem:

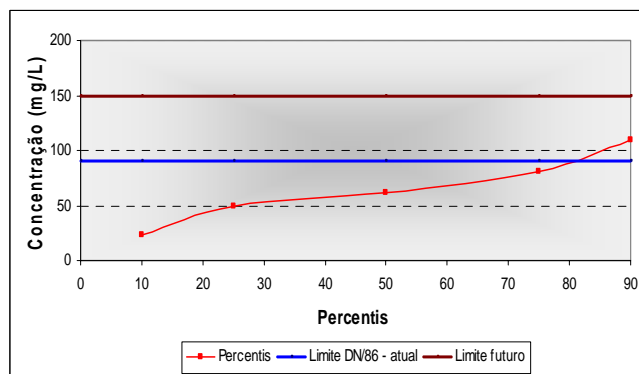
- |                            |                    |
|----------------------------|--------------------|
| 1- Efluente bruto          | 4- Equalizador     |
| 2- Após a caixa de gordura | 5- Após o flotador |
| 3- Após a peneira estática | 11- Efluente final |



**Figura 5.2** – Série temporal dos valores das concentrações de  $DQO_t$



**Figura 5.3** – Série temporal da eficiência global do sistema para remoção de  $DQO_t$

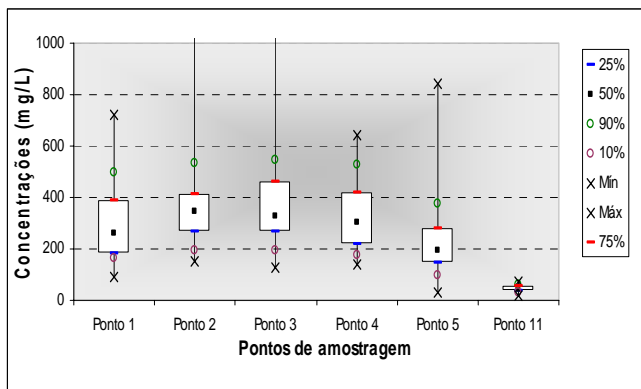


**Figura 5.4** – Percentis de atendimento à legislação para  $DQO_t$

### 5.1.2 Sólidos suspensos totais, SST

A Figura 5.5 apresenta o perfil das concentrações de SST em função dos pontos de amostragem. Observa-se um leve decaimento das concentrações de SST durante o processo de tratamento primário (do ponto 1 ao 5) e um acentuado decréscimo após passar pelo tratamento biológico (filtro anaeróbio).

A Figura 5.6 mostra que, apesar das grandes variações nas concentrações de SST no afluente ao filtro anaeróbio, o comportamento do sistema em relação ao parâmetro mostrou-se eficiente, produzindo sistematicamente um efluente final abaixo do padrão imposto pela DN 10/86 – FEAM-COPAM, quais sejam, 100 mg/L para o valor máximo da média diária e 60 mg/L para média aritmética mensal.

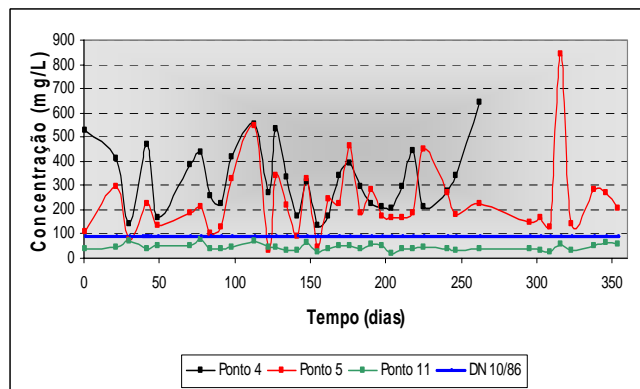


**Figura 5.5** – Perfil das concentrações de SST em função dos pontos de amostragem

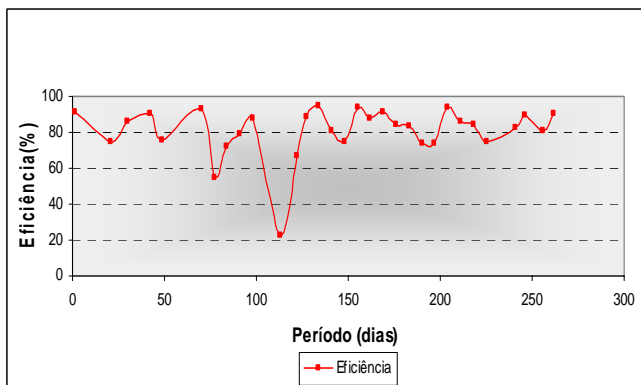
Pontos de amostragem:

- |                            |                    |
|----------------------------|--------------------|
| 1- Efluente bruto          | 4- Equalizador     |
| 2- Após a caixa de gordura | 5- Após o flotador |
| 3- Após a peneira estática | 11- Efluente final |

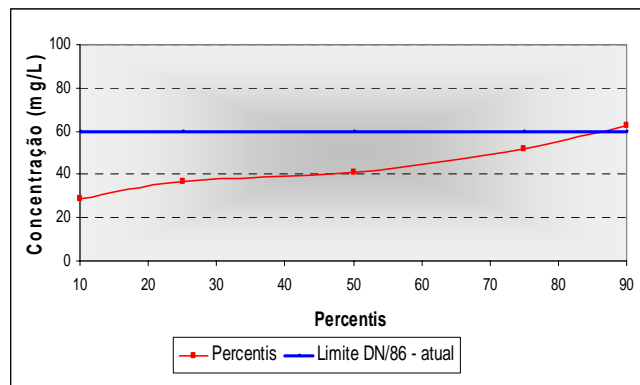
A série temporal da eficiência global do sistema, assim com os percentis de atendimento à legislação em relação às concentrações de SST são apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente.



**Figura 5.6** – Série temporal dos valores das concentrações de SST



**Figura 5.7** – Série temporal da eficiência global do sistema para remoção de SST

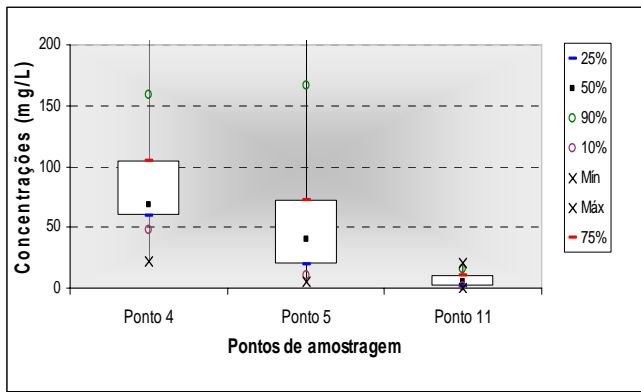


**Figura 5.8** – Percentis de atendimento à legislação para SST

### 5.1.3 Óleos e graxas

A Figura 5.9 apresenta o perfil de decaimento da concentração de óleos e graxas em função dos pontos de amostragem. Observa-se, como era de se esperar, que a concentração de óleos e graxas no ponto 5 sofre uma redução significativa, pois é nesse ponto que se faz a remoção de gorduras através do sistema de flotação. Entretanto o sistema só adquiriu estabilidade após passar pelo filtro anaeróbio (ponto 11).

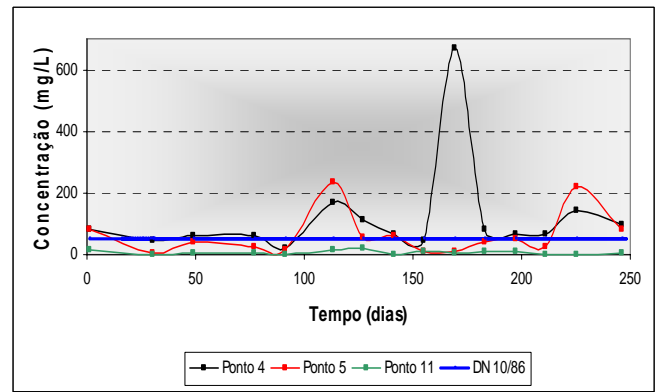
A Figura 5.10 mostra a série temporal da evolução das concentrações de óleos e graxas do efluente equalizado, flotado, filtrado e a DN 10/86 FEAM – COPAM, qual seja, 50 mg/L.



**Figura 5.9** – Perfil das concentrações de óleos e graxas em função dos pontos de amostragem

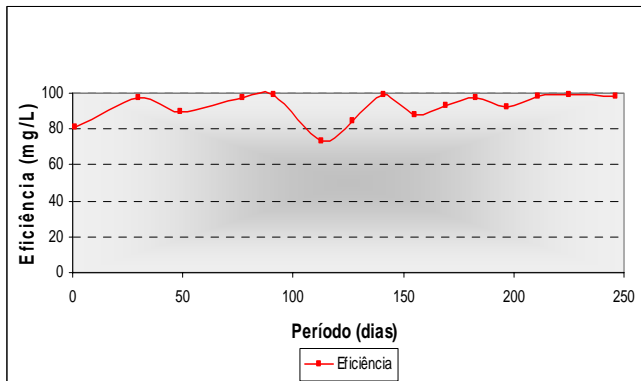
Pontos de amostragem:

- |                            |                    |
|----------------------------|--------------------|
| 1- Efluente bruto          | 4- Equalizador     |
| 2- Após a caixa de gordura | 5- Após o flotador |
| 3- Após a peneira estática | 11- Efluente final |

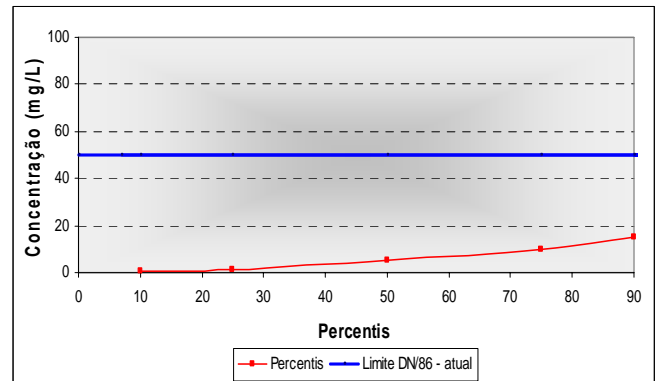


**Figura 5.10** – Série temporal dos valores das concentrações de óleos e graxas

A série temporal da eficiência global do sistema, assim com os percentis de atendimento à legislação em relação às concentrações de óleos e graxas são apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12, respectivamente.



**Figura 5.11** – Série temporal da eficiência global do sistema para remoção de óleos e graxas



**Figura 5.12** – Percentis de atendimento à legislação para óleos e graxas

## 5.2 Perfil do decaimento da matéria orgânica no filtro anaeróbio

### 5.2.1 Avaliação crítica dos principais parâmetros

A Tabela 5.3 compara os diversos parâmetros sugeridos e aplicados na operação do filtro anaeróbio em estudo. Pode-se observar que o filtro avaliado apresentou eficiência de remoção de DQO bem superior às reportadas na literatura, todavia operando com tempo de detenção hidráulica muito alto e carga orgânica volumétrica muito baixa, além de elevada altura do meio suporte.

**Tabela 5.3** – Comparativo dos principais parâmetros avaliados

Parâmetro	Unidade	Literatura especializada			
		Kasapgil (1994)	Ince (2000)	Machado (2002)	Filtro avaliado
Tempo de detenção hidráulica (TDH)	hora	20	12	102	319
Carga orgânica volumétrica (COV)	kgDQO/m <sup>3</sup> .d	6	13	0,94	0,15
Altura do meio suporte	metro	-	-	1,50	5,10
Concentração DQO afluente	mg/l	2000 – 6000	2000 – 6000	4010	1980
Eficiência remoção de DQO	%	85	80	89	95

Face à dificuldade de se comparar os resultados reportados na literatura com os do filtro avaliado, devido ao elevado TDH e à elevada altura do meio suporte deste último, houve a necessidade de se proceder a análise de desempenho do mesmo ao longo de sua altura. Com isso, foi possível aferir os ganhos obtidos em cada compartimento adicional de filtro (13,00 m x 13,00 m de área x 0,50 m de altura), a partir do ponto de amostragem 6, conforme apresentado na Tabela 5.4. Para tanto, foram tomadas amostras do afluente (ponto 5) e ao longo dos pontos de amostragem 6 a 11, sendo o ponto 11 o efluente final do filtro.

**Tabela 5.4** – Variação dos principais parâmetros do filtro anaeróbio ao longo da altura do meio suporte

Principais parâmetros	Pontos de amostragem					
	6	7	8	9	10	11
Altura (fundo falso + meio suporte) (m)	0,90	1,40	1,90	2,40	2,90	5,90
Volume acumulado (m <sup>3</sup> )	152,1	236,6	321,1	405,6	490,1	997,1
Tempo de detenção hidráulica - TDH (h) *	49	76	103	130	157	319
Carga orgânica volumétrica - COV (kg DQO/m <sup>3</sup> .d)*	0,97	0,63	0,46	0,37	0,30	0,15

\*Inclui os índices de vazios provocados pelo material filtrante (brita de escória nº4), correspondente a aproximadamente 50%.

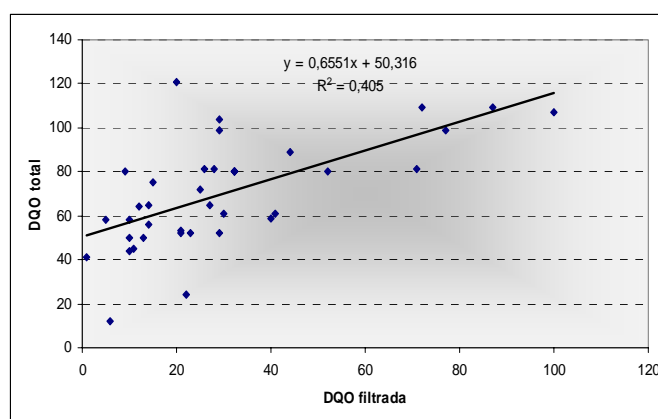
Legenda (pontos de amostragem):

6- À 90 cm do fundo do                      9- À 240 cm do fundo do  
 7- À 140 cm do fundo do                  10- À 290 cm do fundo do  
 8- À 190 cm do fundo do                11- Efluente final

Como os pontos de amostragem 6 a 10 localizavam-se no interior do filtro, foi necessário que se trabalhasse com amostras filtradas, para se retirar o efeito dos sólidos suspensos contidos no lodo amostrado ao longo da altura do filtro, sobre a influência na remoção de DQO.

Para se obter a  $DQO_t$  nos diversos pontos do interior do filtro tentou-se em primeiro lugar obter uma correlação entre  $DQO_{part}$  e SSV, entretanto tal relação mostrou-se muito baixa, pois a  $DQO_{part}$  manteve-se em um mesmo patamar apesar do acréscimo das concentrações de SSV.

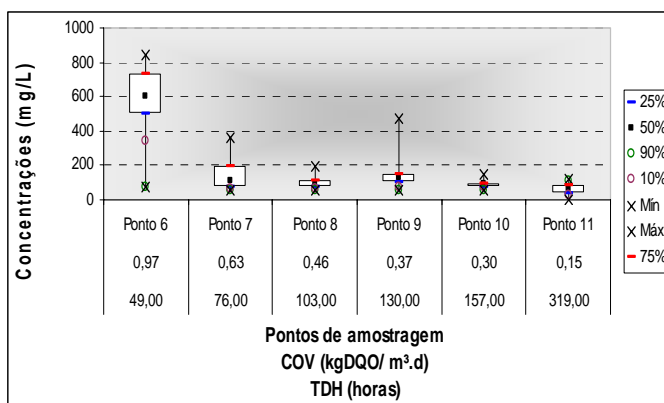
Em outra tentativa foi estabelecida com base nas análises de  $DQO_f$  e  $DQO_t$  feitas a partir do ponto 11 (efluente final) a correlação entre esses parâmetros e foi possível se estimar a DQO total nos diversos pontos do interior do filtro ( $DQO_t = 0,655 \cdot DQO_f + 50,3$ ), ilustrados pela Figura 5.13 a seguir.



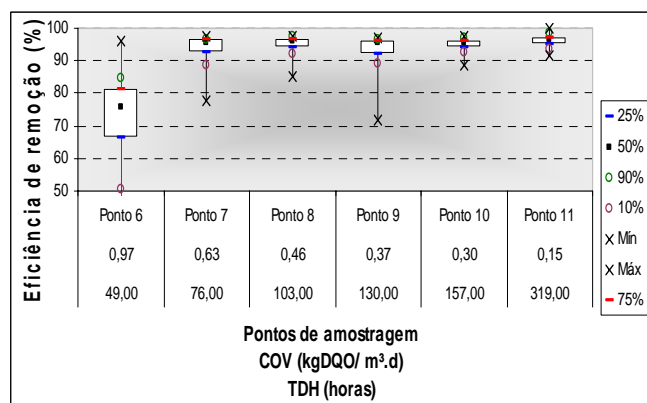
**Figura 5.13** – Correlação entre a  $DQO_t$  e  $DQO_f$  no efluente final

### 5.2.1.1 Diagramas de Box-Whisker

Para uma melhor comparação entre as concentrações e as eficiências na remoção de  $DQO_t$  ao longo de todo o filtro anaeróbio, são apresentados diagramas de Box-Whisker, nas Figuras 5.14 e 5.15, baseados na correlação estabelecida anteriormente.



**Figura 5.14** – Perfil das concentrações de  $DQO_t$  em função da altura do meio suporte



**Figura 5.15** – Perfil da eficiência de decaimento de  $DQO_t$  em função do TDH e COV

Legenda (pontos de amostragem):

- 7- À 140 cm do fundo do filtro
- 10- À 290 cm do fundo do filtro
- 8- À 190 cm do fundo do filtro
- 11- Efluente final
- 9- À 240 cm do fundo do filtro

Pode-se observar, pelas Figuras 5.14 e 5.15, que as concentrações e as eficiências de remoção de  $DQO_t$  não se alteraram substancialmente já a partir do ponto 7 de amostragem, que corresponde aos seguintes parâmetros operacionais do filtro: altura de meio suporte = 0,60m; TDH = 76 h; COV = 0,63 kgDQO/m<sup>3</sup>.d. Todavia, resultados excepcionais, em termos de estabilidade do filtro, só foram obtidos a partir do ponto de amostragem 10, que corresponde aos seguintes parâmetros: altura de meio suporte = 2,90m; TDH = 157 h; COV = 0,30 kgDQO/m<sup>3</sup>.d.

### 5.2.2 Alcalinidade

A Figura 5.16 apresenta os resultados das concentrações de alcalinidade no ponto 4 – efluente equalizado, no ponto 5 – efluente flotado e no ponto 11 – após passar pelo filtro anaeróbio. O sistema foi capaz de produzir alcalinidade de forma constante e ao longo do período de monitoramento, conforme observado na Figura 5.17. A produção de alcalinidade é indicativa do bom desempenho e da estabilidade do filtro anaeróbio, uma vez que possibilita a manutenção do tamponamento do sistema.

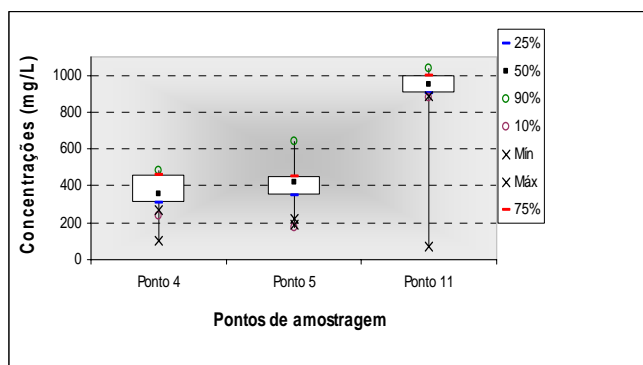


Figura 5.16 – Perfil da alcalinidade em função dos pontos de amostragem

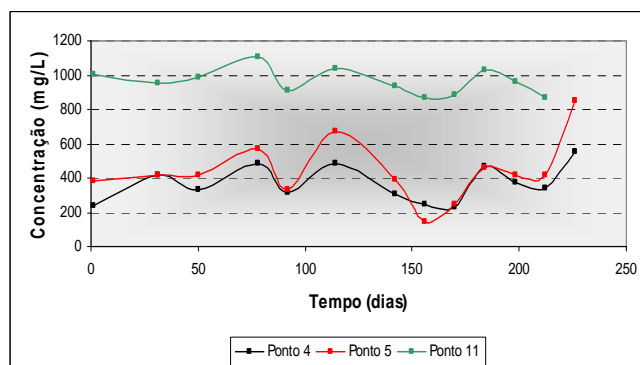


Figura 5.17 – Série temporal dos valores da alcalinidade

### 5.2.3 Ácidos graxos voláteis

O efeito da altura do meio suporte na degradação da matéria orgânica no interior do filtro anaeróbio, bem como a estabilidade do processo de digestão anaeróbia, foram avaliados através da realização de análises de ácidos graxos voláteis em diferentes pontos de amostragem ao longo da altura no filtro. Através dessas análises, foram obtidos os perfis de decaimento das concentrações de matéria orgânica e ácidos graxos voláteis no filtro anaeróbio.

#### 5.2.3.1 Perfil de decaimento de ácidos graxos voláteis no filtro anaeróbio

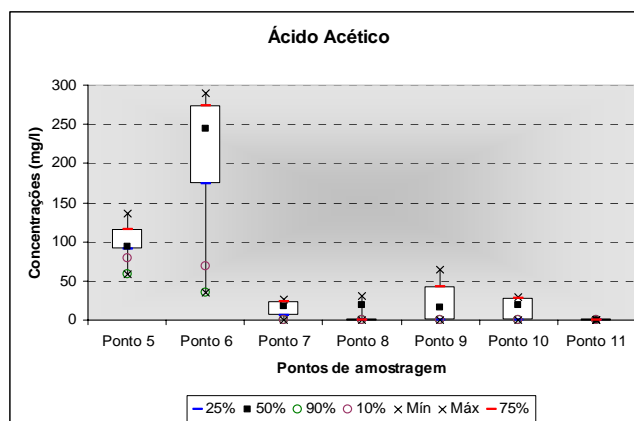
Os dados estatísticos básicos obtidos para as concentrações de ácidos graxos voláteis são apresentados na Tabela 5.5. Esses resultados indicaram a predominância do ácido acético. O ácido propiônico esteve presente em concentrações maiores que os outros ácidos, mas bem inferiores às de ácido acético. Ambos os ácidos estiveram presentes no esgoto bruto em concentrações médias de  $91 \text{ mg.L}^{-1}$  para o ácido acético,  $57 \text{ mg.L}^{-1}$  para o ácido propiônico,  $21 \text{ mg.L}^{-1}$  para o ácido butírico e  $7 \text{ mg.L}^{-1}$  para o ácido valérico (Tabela 5.9). Os ácidos, iso-butírico, e iso-valérico foram detectados, porém em concentrações abaixo de  $1 \text{ mg.L}^{-1}$ , no esgoto bruto.

**Tabela 5.5** - Dados estatísticos básicos para DQO<sub>f</sub> e ácidos graxos voláteis

Parâmetro	Estatística	Pontos de amostragem										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DQO <sub>f</sub> - FA (mg/L)	Nº de dados	-	-	-	-	-	24	24	24	24	24	41
	<b>Média</b>	-	-	-	-	-	<b>656</b>	<b>89</b>	<b>50</b>	<b>99</b>	<b>47</b>	<b>32</b>
	Mínimo	-	-	-	-	-	37	7	5	3	9	1
	Máximo	-	-	-	-	-	1214	470	213	637	148	142
	DP	-	-	-	-	-	300	115	45	126	32	30
Ácido acético (mg/L)	Nº de dados	-	-	-	-	6	6	6	6	6	6	6
	<b>Média</b>	-	-	-	-	<b>91</b>	<b>163</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>9</b>	<b>0</b>
	Mínimo	-	-	-	-	59	35	0	0	0	0	0
	Máximo	-	-	-	-	137	290	26	31	64	30	0
	DP	-	-	-	-	26	108	11	15	26	14	0
Ácido propiónico (mg/L)	Nº de dados	-	-	-	-	6	6	6	6	6	6	6
	<b>Média</b>	-	-	-	-	<b>57</b>	<b>86</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>0</b>
	Mínimo	-	-	-	-	22	13	0	0	0	0	0
	Máximo	-	-	-	-	95	136	11	12	18	12	1
	DP	-	-	-	-	29	57	5	6	7	6	1
Ácido isobutírico (mg/L)	Nº de dados	-	-	-	-	6	6	6	6	6	6	6
	<b>Média</b>	-	-	-	-	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	Mínimo	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0
	Máximo	-	-	-	-	2	8	1	2	0	0	0
	DP	-	-	-	-	1	3	0	1	0	0	0
Ácido butírico (mg/L)	Nº de dados	-	-	-	-	6	6	6	6	6	6	6
	<b>Média</b>	-	-	-	-	<b>21</b>	<b>28</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	Mínimo	-	-	-	-	2	2	0	0	0	0	0
	Máximo	-	-	-	-	41	65	3	2	4	1	1
	DP	-	-	-	-	12	27	1	0	2	0	0
Ácido isovalérico (mg/L)	Nº de dados	-	-	-	-	6	6	6	6	6	6	6
	<b>Média</b>	-	-	-	-	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	Mínimo	-	-	-	-	1	0	0	0	0	0	0
	Máximo	-	-	-	-	3	7	0	0	0	1	1
	DP	-	-	-	-	1	2	0	0	0	0	0
Ácido valérico (mg/L)	Nº de dados	-	-	-	-	6	6	6	6	6	6	6
	<b>Média</b>	-	-	-	-	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	Mínimo	-	-	-	-	3	0	0	0	0	0	0
	Máximo	-	-	-	-	10	25	1	0	0	1	1
	DP	-	-	-	-	3	9	0	0	0	0	0

### Ácido acético

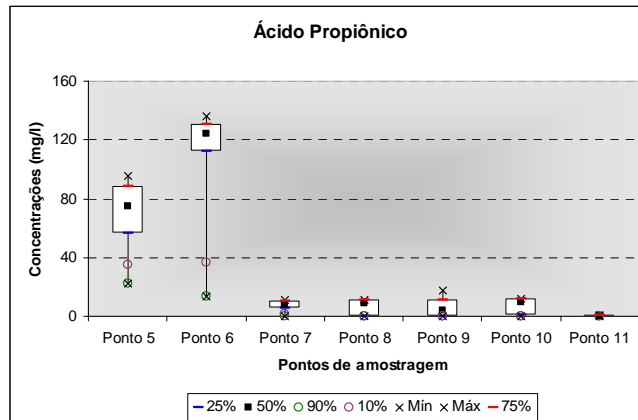
Os perfis de decaimento das concentrações de ácido acético no filtro anaeróbio, ao longo da coluna de meio suporte são apresentados na Figura 5.18. Ocorreu uma evidente diminuição nas concentrações médias de ácido acético nos pontos de amostragem do filtro. Observa-se que as concentrações nos pontos 5 (esgoto bruto) e 6 (ponto mais próximo à manta de lodo) são maiores que os demais, o que se explica pela maior atividade bacteriana no fundo do filtro. Todavia, as concentrações nos pontos 9 e 10 nos mostram que ainda há atividade metabólica nesses pontos e que somente a partir do ponto 10 que a produção de ácido acético diminui abruptamente.



**Figura 5.18** – Perfil das concentrações de ácido acético em função dos pontos de amostragem

### Ácido propiônico

Os perfis de decaimento das concentrações de ácido propiônico no filtro anaeróbio, ao longo da coluna de meio suporte, durante o período avaliado, são apresentados na Figura 5.19. Tal qual o ácido acético, as concentrações de ácido propiônico também estavam presentes em maiores valores, próximos ao fundo do filtro (pontos 5 e 6), e sua produção foi detectada até o ponto 10 com valores mais significativos.

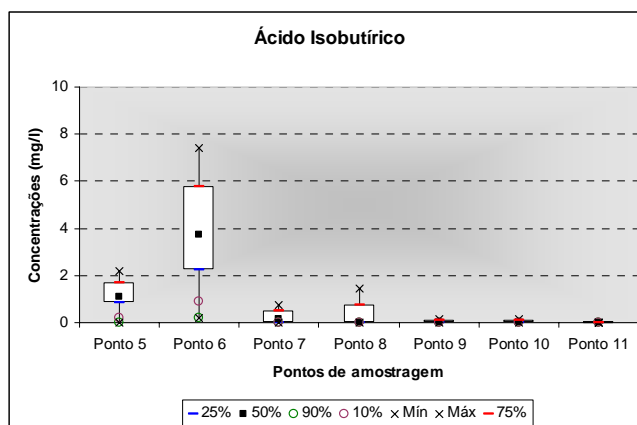


**Figura 5.19** – Perfil das concentrações de ácido propiônico em função dos pontos de amostragem

### Ácido isobutírico

Os perfis de decaimento das concentrações de ácido isobutírico no filtro anaeróbio, ao longo da coluna de meio suporte, durante o período avaliado, são apresentados na Figura 5.20.

Observa-se que as concentrações se mantiveram inferiores a  $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$ , exceto no ponto 6 ( $3 \text{ mg.L}^{-1}$  em média). Entretanto, a partir do ponto 9 as concentrações reduziram-se ainda mais.

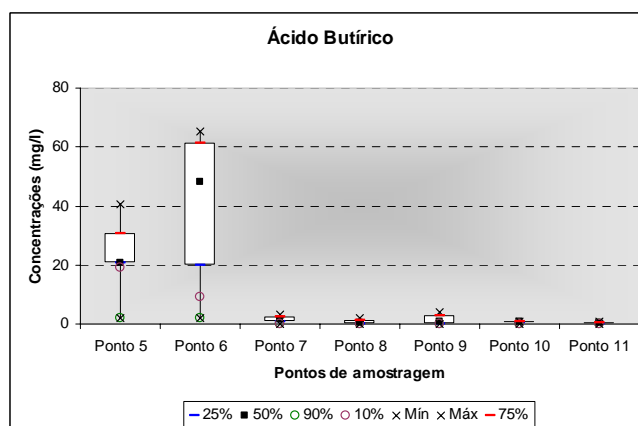


**Figura 5.20** – Perfil das concentrações de ácido isobutírico em função dos pontos de amostragem

### Ácido butírico

Os perfis de decaimento das concentrações de ácido butírico no filtro anaeróbio, ao longo da coluna de meio suporte, durante o período avaliado, são apresentados na Figura 5.21.

Observa-se que as concentrações se mantiveram inferiores a  $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$ , exceto nos pontos 5 e 6 ( $21$  e  $28 \text{ mg.L}^{-1}$  respectivamente em média).

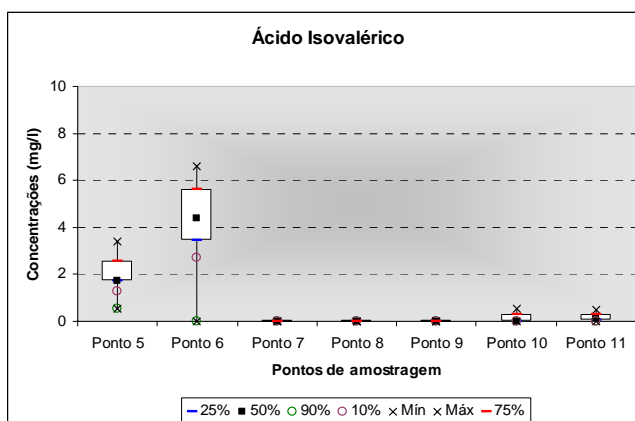


**Figura 5.21** – Perfil das concentrações de ácido butírico em função dos pontos de amostragem

### Ácido isovalérico

Os perfis de decaimento das concentrações de ácido isovalérico no filtro anaeróbio, ao longo da coluna de meio suporte, durante o período avaliado, são apresentados na Figura 5.22.

Observa-se que as concentrações se mantiveram inferiores a  $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$ , exceto nos pontos 5 e 6 ( $2$  e  $3 \text{ mg.L}^{-1}$  respectivamente em média).

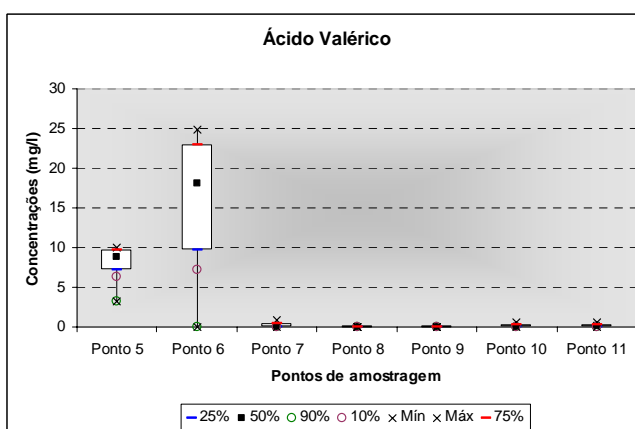


**Figura 5.22** – Perfil das concentrações de ácido isovalérico em função dos pontos de amostragem

### Ácido valérico

Os perfis de decaimento das concentrações de ácido isovalérico no filtro anaeróbio, ao longo da coluna de meio suporte, durante o período avaliado, são apresentados na Figura 5.23.

Observa-se que as concentrações se mantiveram inferiores a  $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$ , exceto nos pontos 5 e 6 ( $7$  e  $12 \text{ mg.L}^{-1}$  respectivamente em média).



**Figura 5.23** – Perfil das concentrações de ácido valérico em função dos pontos de amostragem

### 5.3 Custos de implantação e operação de lodos ativados x filtro anaeróbio

Este trabalho relata a experiência operacional e a análise de desempenho de um filtro anaeróbio em escala real tratando efluentes de um laticínio. Tal relato busca subsidiar profissionais especializados em projetos de estações de tratamento de efluentes, uma vez que a literatura especializada raramente apresenta informações acerca de sistemas operando em escala plena, notadamente nesta modalidade.

O relatório final do projeto “Minas Ambiente – sub projeto 3” propôs para o tratamento de efluentes de laticínios as seguintes etapas: tratamento preliminar, tanque de equalização, filtro anaeróbio seguido de i) biofiltro aerado submerso – BAS, ii) filtro biológico percolador – FBP ou iii) disposição no solo – DS (MACHADO et al, 2002). O pós-tratamento do efluente do filtro anaeróbio foi necessário, uma vez que somente a etapa anaeróbia não foi capaz de enquadrar os efluentes aos padrões impostos pela legislação vigente.

Com o objetivo de subsidiar os empreendedores e projetistas com relação à tomada de decisões quanto à escolha do sistema de tratamento de efluentes, o relatório final do projeto “Minas Ambiente – sub projeto 3” também apresentou a estimativa de custos para a execução dos processos propostos para diversas faixas de capacidade de recepção de leite, sendo que no presente trabalho, para efeito de comparações, selecionou-se somente a faixa sugerida de 40.000 a 60.000 litros de leite por dia, conforme apresentado no Tabela 5.6.

**Tabela 5.6** – Comparativo de custos de implantação de diversos tipos de tratamento

Estimativa de custo de construção (Quadro resumo)  
Faixa de 40.000 a 60.000 litros de leite/dia

Tipo de tratamento	Valor (R\$) <sup>2</sup>	Valor(US\$) <sup>3</sup>
FA-FBP	372.892,96	175.892,91
FA-BAS	238.832,14	112.656,67
FA-DS	215.024,76	101.426,77
Lodos ativados - LA	187.142,97	88.275,00

Fonte: adaptado de MACHADO, 2002.

<sup>2</sup>Valores atualizados pelo CUB – Custo unitário básico divulgado pelo SINDUSCOM – MG.

<sup>3</sup>Cotação oficial do Dólar em 18/03/2006. 1,00 US\$ = R\$2,12.

Entretanto, para consolidar tais valores, buscou-se valores de mercado para a implantação de um sistema de lodos ativados convencional, com as mesmas características do laticínio objeto desta pesquisa, sabendo-se que os valores sugeridos pelo projeto “Minas Ambiente – sub projeto 3” engloba uma faixa de capacidade de recepção de leite entre 40.000 e 60.000 L/dia.

### 5.3.1 Sistema de lodos ativados convencional

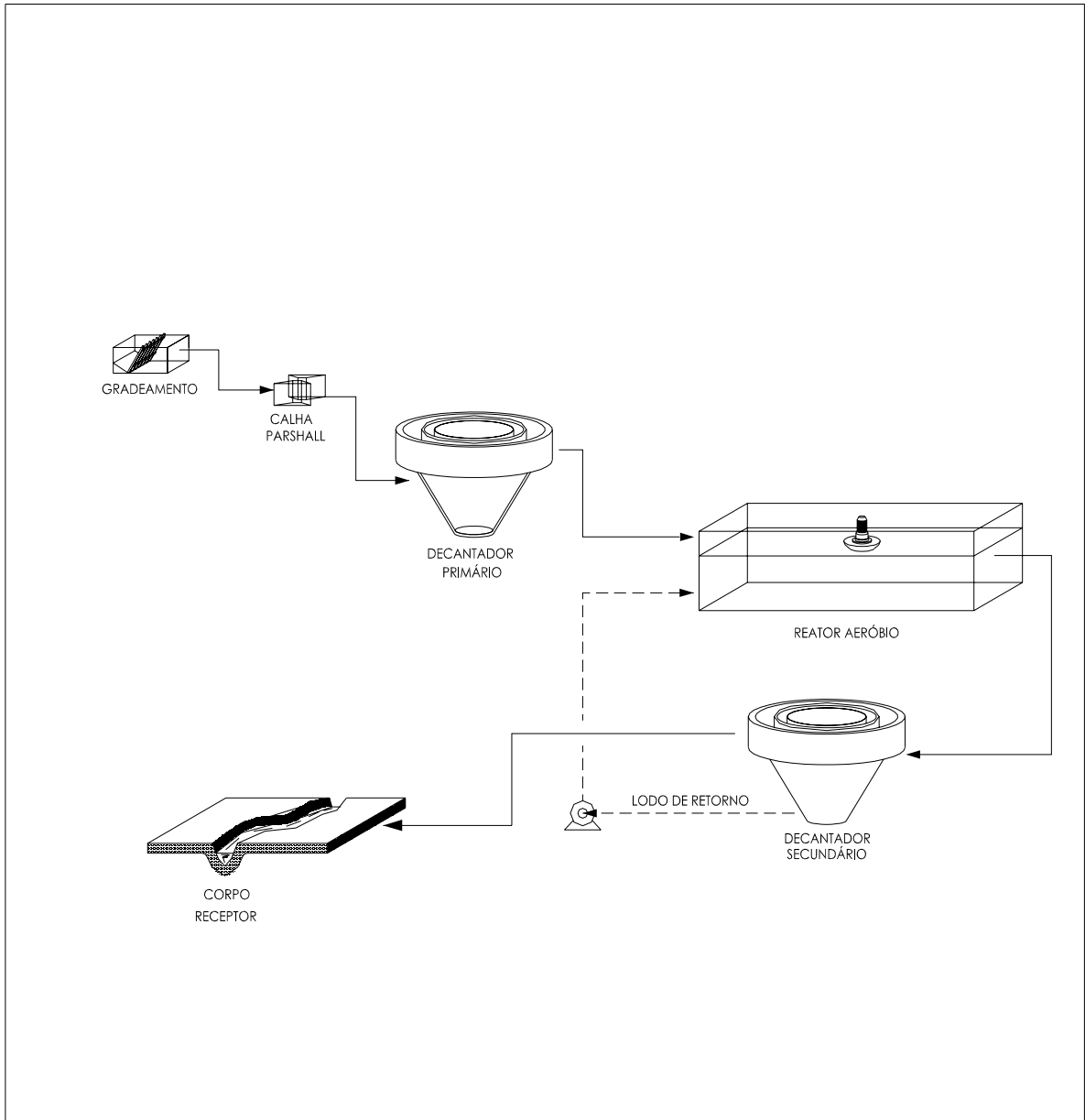
A escolha do sistema de lodos ativados convencional, para efeito de comparação de custos de implantação e operação, se deu devido ao fato deste sistema ser amplamente utilizado em nível mundial, tanto para tratamento de despejos domésticos quanto para industriais (von SPERLING, 2000).

Como ponto de partida para a elaboração do orçamento, considerou-se inicialmente a implantação de um sistema de lodos ativados convencional, composto de: gradeamento, medidores de vazão tipo calha “Parshall”, decantador primário, reator aeróbio, decantador secundário. Todos os elementos foram dimensionados segundo critérios da empresa Engenho Nove Engenharia Ambiental Ltda, para laticínios cuja capacidade de processamento de leite aproxima-se de 50.000/dia, conforme mostrado nas Figuras 5.24 a 5.27.

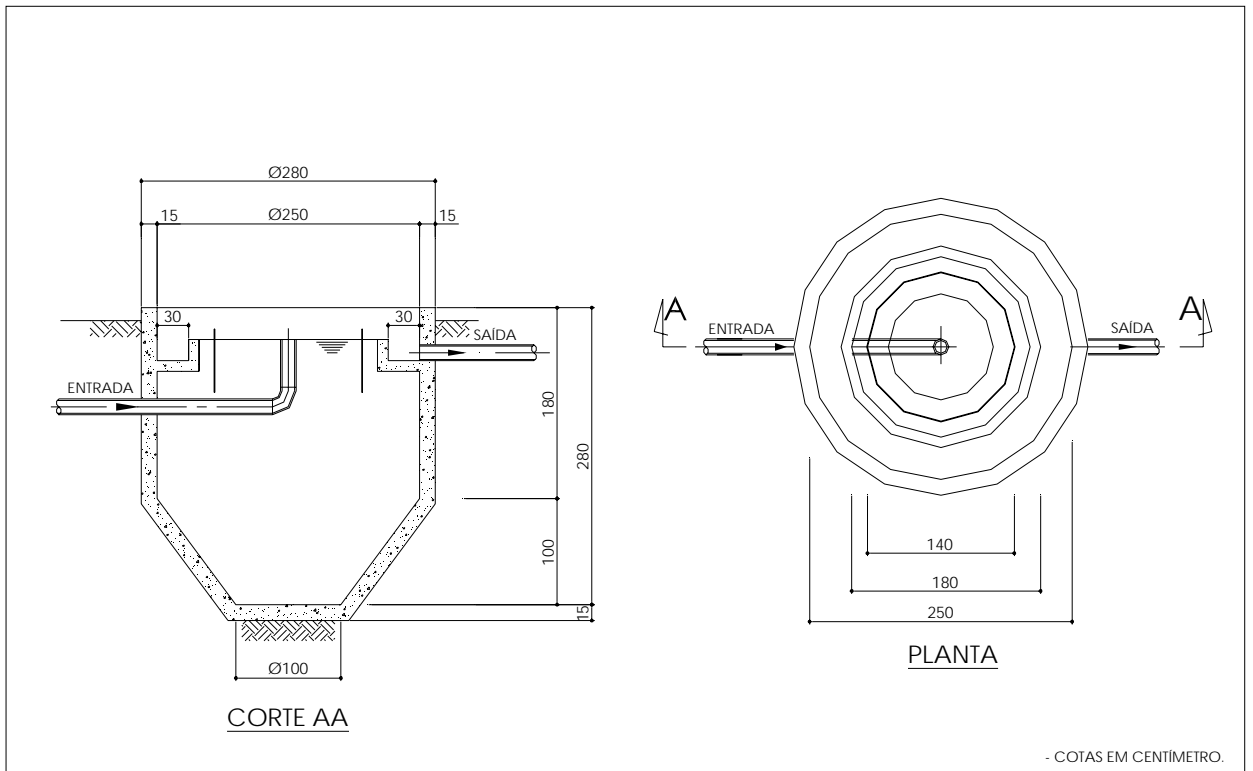
Para efeito de orçamento, alguns parâmetros de projeto foram assumidos, com o objetivo de se aproximar ao máximo das características do laticínio avaliado, conforme Tabela 5.7

**Tabela 5.7** - Parâmetros de pré-dimensionamento adotados para o sistema de lodos ativados

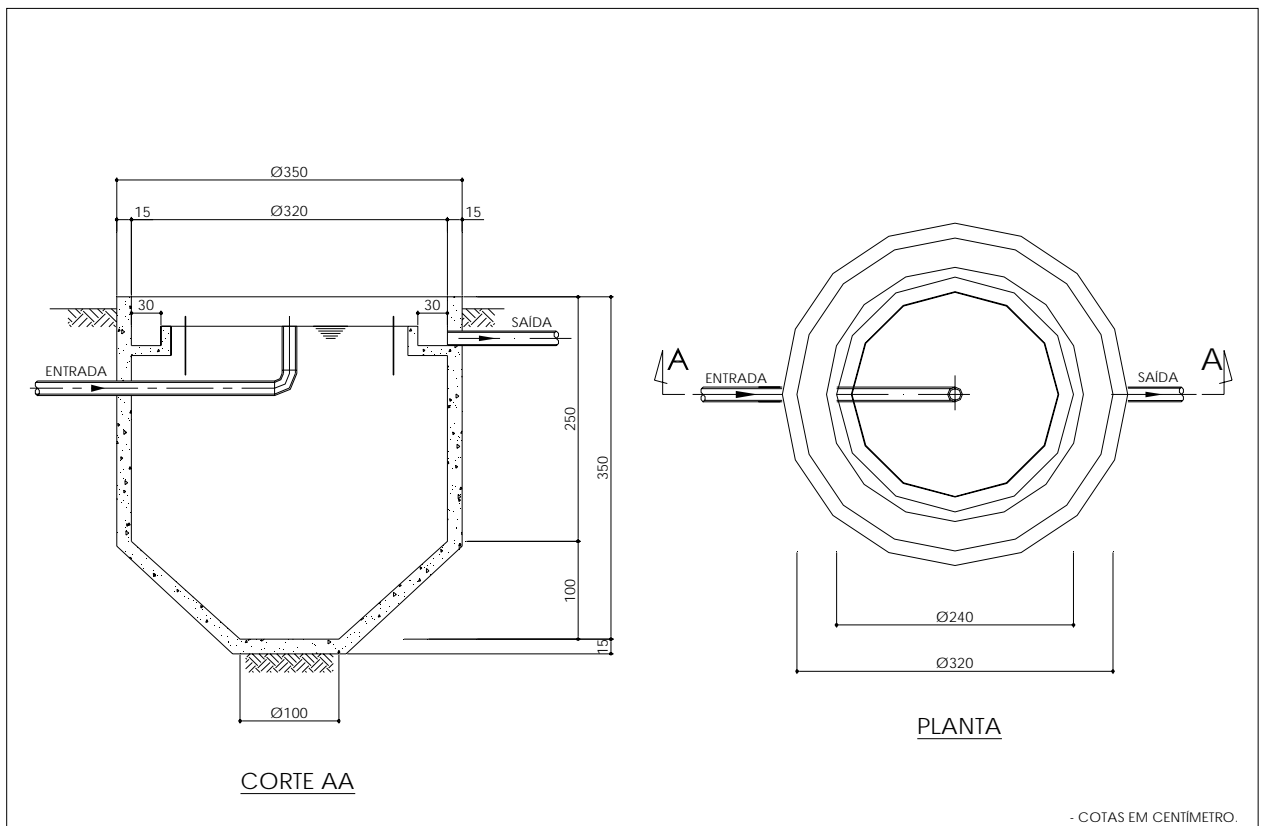
Item	Parâmetro	Valor
Tanque de aeração	Tempo de detenção hidráulica (dias)	4
	Idade do lodo (d)	10
	Concentração de SSVTA (mg/L)	1500
	Concentração de SSTA (mg/L)	2000
	Relação SSV/SS no reator (-)	0,75
	Volume (m <sup>3</sup> )	300
	Dimensões (m) – Borda livre = 0,50m	10x10x3,5
Sistema de aeração	Requisitos O <sub>2</sub> (kgO <sub>2</sub> /d)	146
	Eficiência de oxigenação padrão – aeradores mec. (kgO <sub>2</sub> /kWh)	1,2
	Fator de correção: consumo O <sub>2</sub> padrão / consumo O <sub>2</sub> campo	1,67
	Potencia do aerador (CV)	10
Decantador secundário	Taxa de aplicação hidráulica (Q/A) (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d)	19
	Taxa de aplicação de sólidos [(Q+Q <sub>r</sub> ).X/A] (kgSS/m <sup>2</sup> .d)	105
	Altura da parede lateral (m)	3,5
	Diâmetro do decantador (m)	3,2
	Razão de recirculação (Q <sub>r</sub> /Q)	1,0



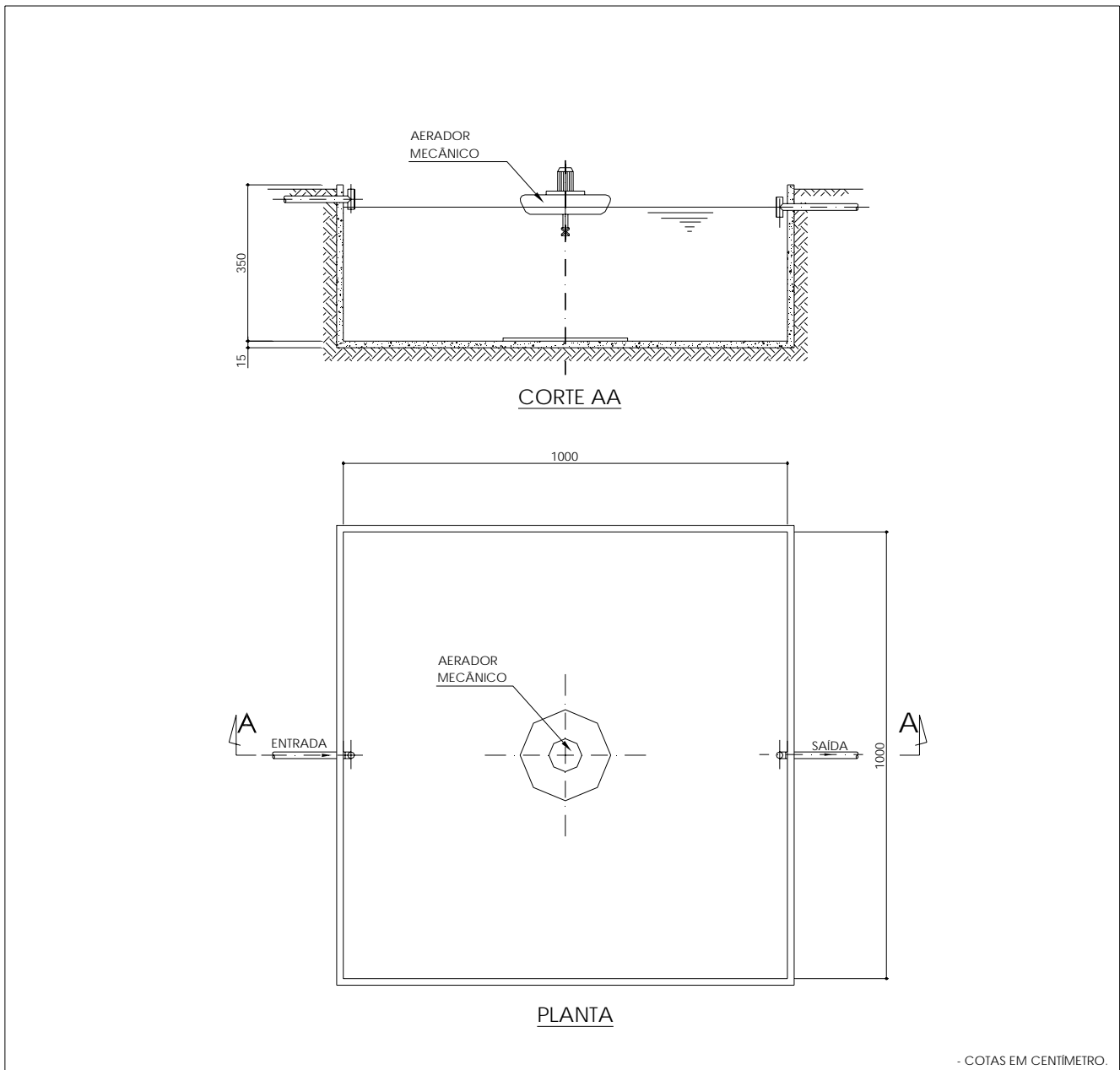
**Figura 5.24** – Fluxograma do processo de lodos ativados proposto



**Figura 5.25** – Planta e corte AA do decantador primário



**Figura 5.26** – Planta e corte AA do decantador secundário

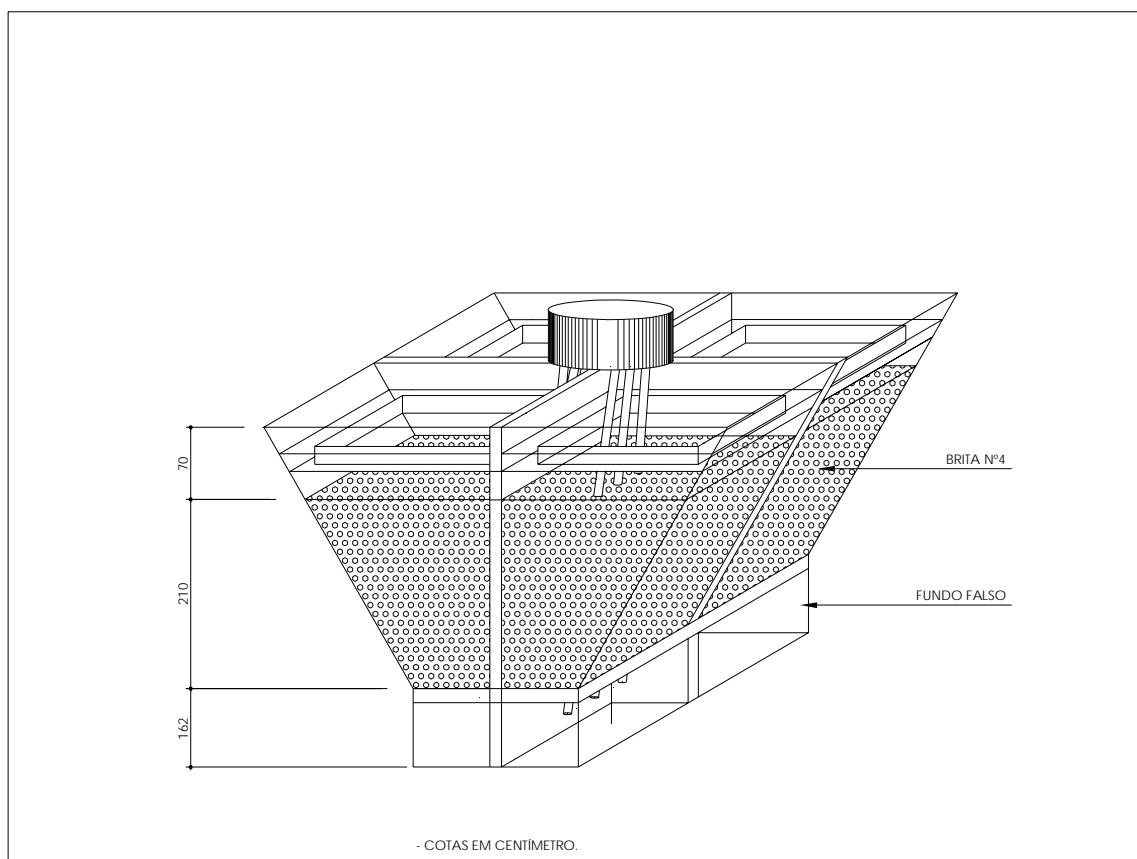


**Figura 5.27** – Planta e corte AA do tanque de aeração

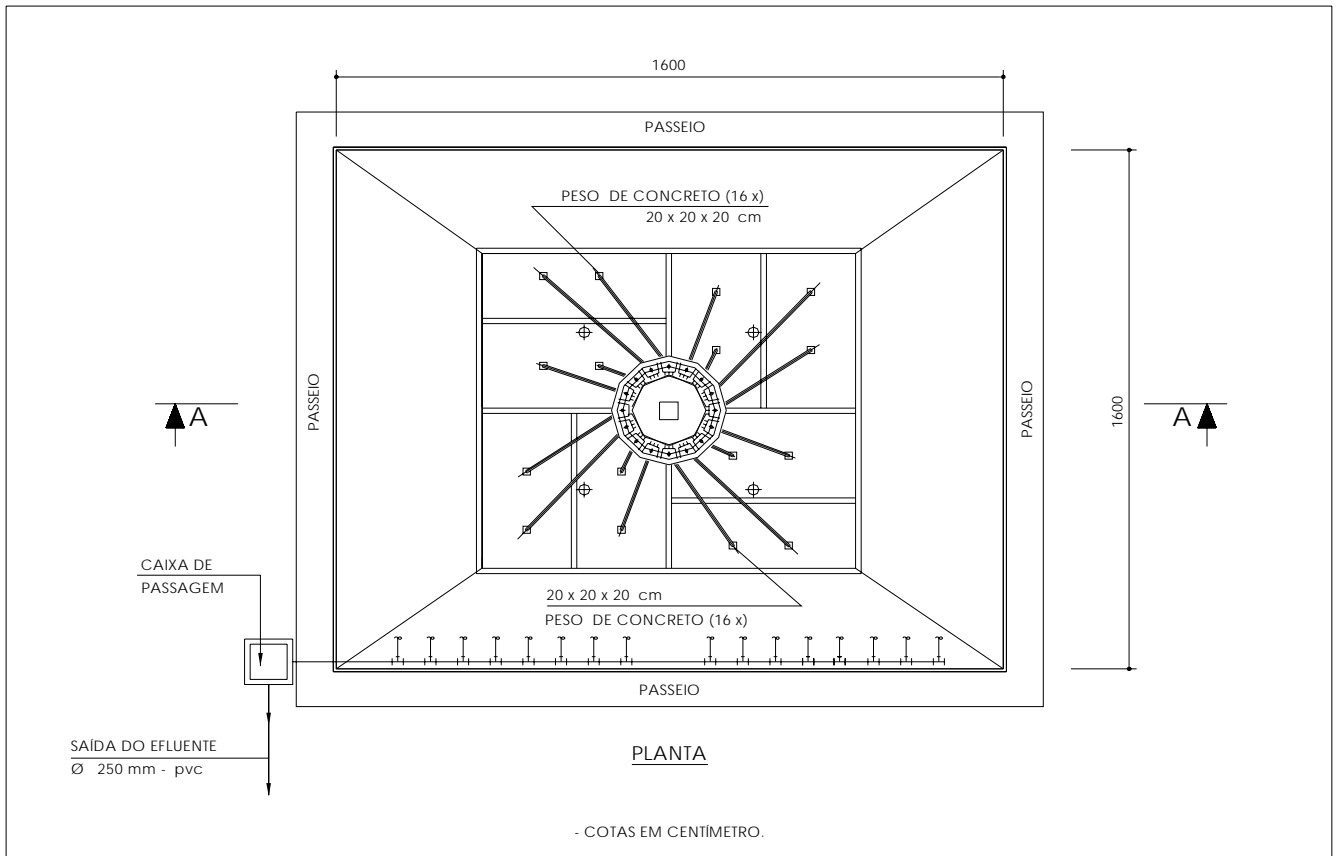
### 5.3.2 Filtro anaeróbio

A possibilidade de se trabalhar com filtros de menor altura de meio suporte, desde que mantido o elevado TDH e a baixa COV, eventualmente com a necessidade de complementação do tratamento para se garantir menor variabilidade das concentrações efluentes e o atendimento aos padrões ambientais, assim como a possibilidade de se trabalhar com filtros mais robustos visando o atendimento aos padrões ambientais em termos de  $DQO_t$  e SST apenas com a unidade anaeróbia, passa pelo conhecimento dos custos de implantação e operação do sistema.

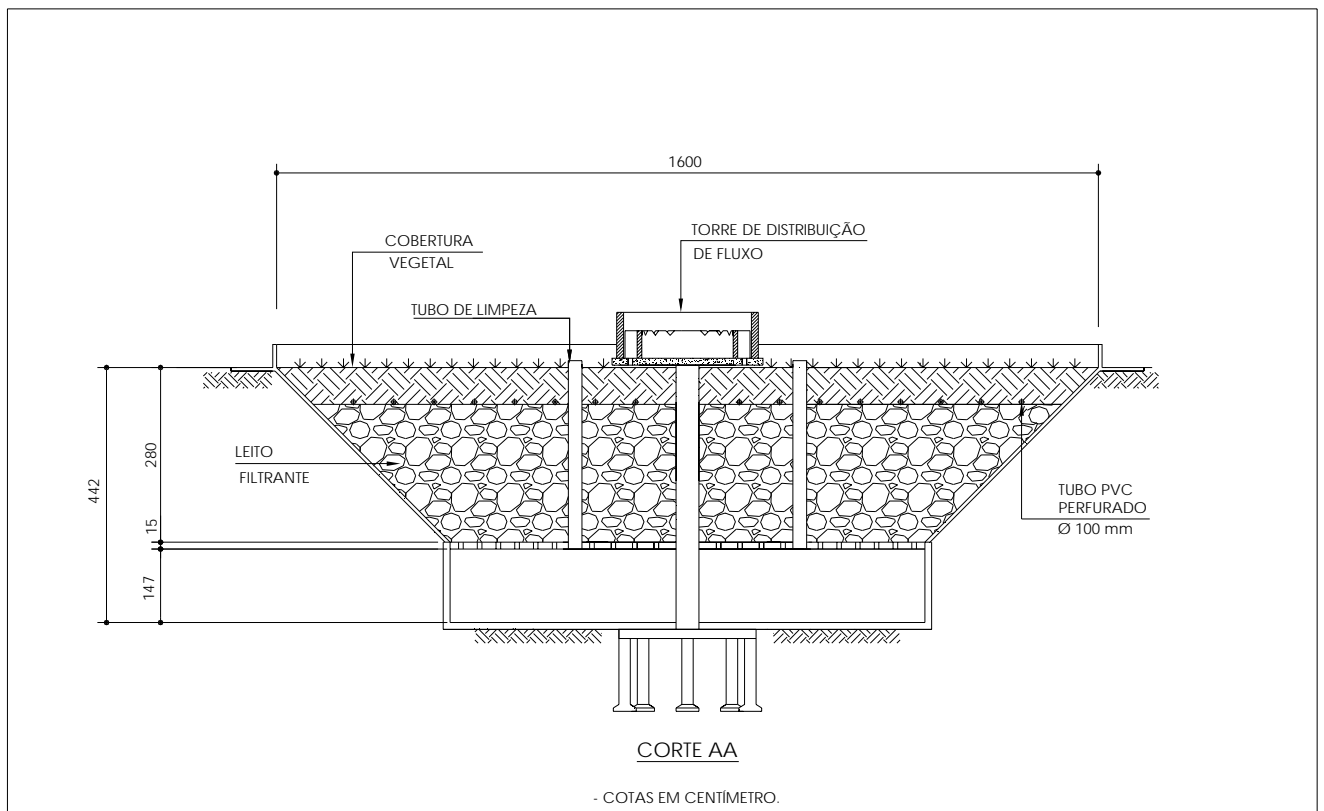
Como ponto de partida para a elaboração do orçamento, considerou-se inicialmente a implantação de um filtro anaeróbio para laticínios cuja capacidade de processamento de leite aproxima-se de 50.000 litros/dia. O processo construtivo adotado baseou-se na opção de escavação em solo, com inclinação dos taludes igual a 45°, revestimento dos taludes com manta asfáltica soldada a fogo e uma camada de concreto (e = 8 cm) sobre tela metálica, malha 15x15 cm, fio 3,4 mm, visando a proteção mecânica da manta asfáltica, fundo falso sob laje de concreto com altura igual a 1,47 m, e camada de meio suporte utilizando brita de gnaiss nº 4 (dimensões entre 5 e 7 cm), conforme apresentado nas Figuras 5.28 a 5.32.



**Figura 5.28** – Perspectiva do filtro anaeróbio proposto



**Figura 5.29** – Planta nível inferior do filtro anaeróbio proposto



**Figura 5.30** – Corte AA do filtro anaeróbio proposto (meio suporte)

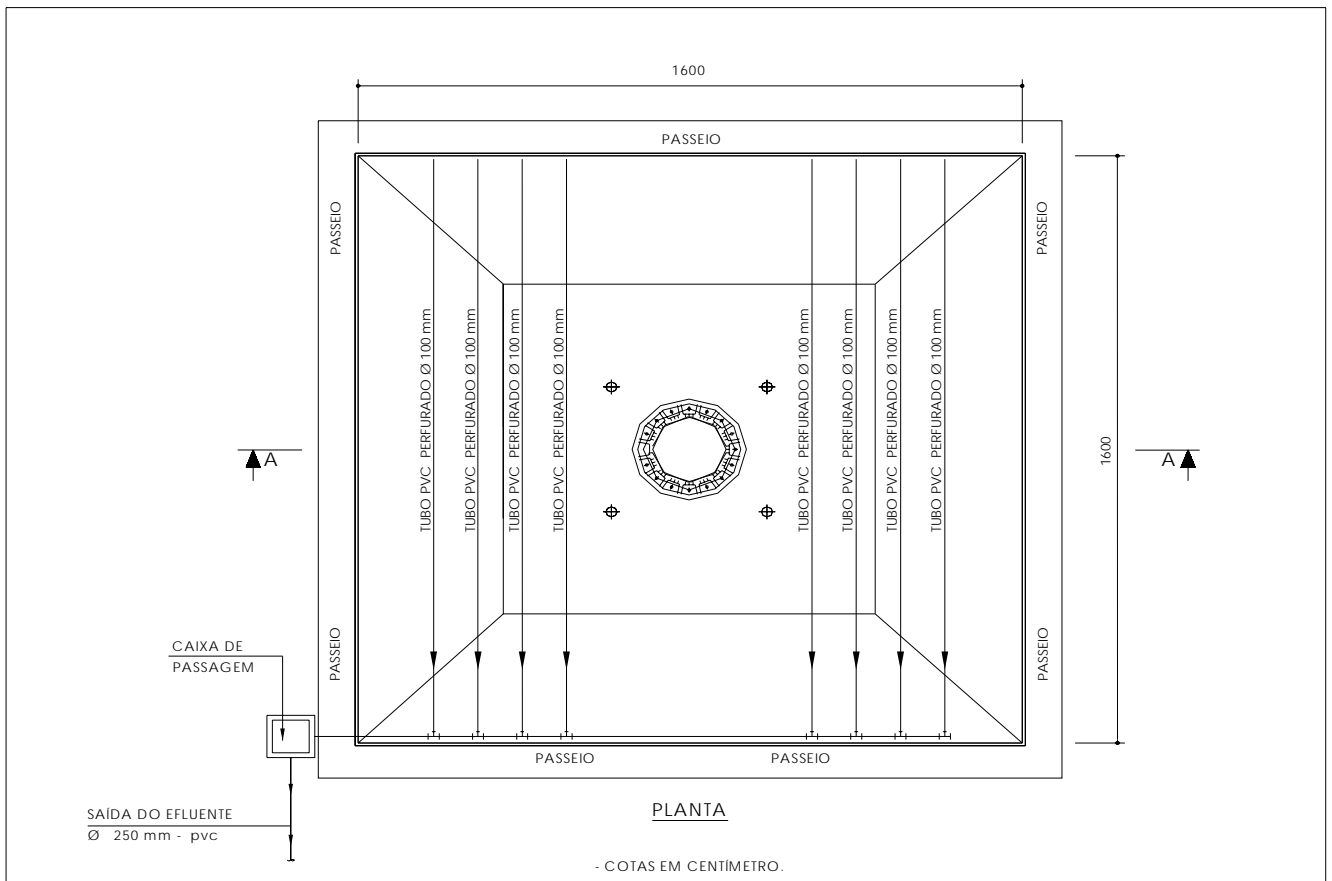


Figura 5.31 – Planta baixa nível superior do filtro anaeróbio proposto

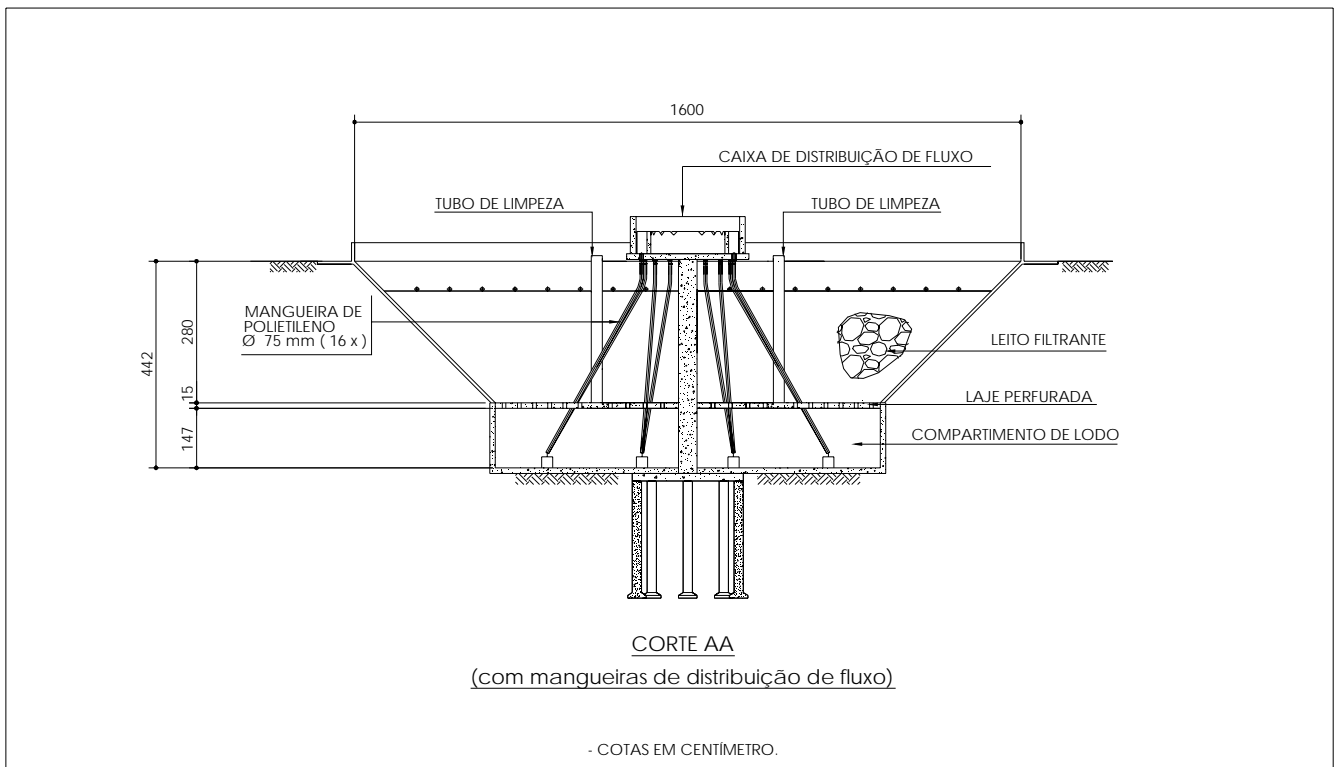


Figura 5.32 – Corte AA do filtro anaeróbio proposto (sistema de distribuição afluyente)

As estimativas de custos apresentadas nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 expressam de forma simplificada os custos de implantação dos sistemas propostos, variando-se a carga orgânica volumétrica, o tempo de detenção hidráulica e a altura do meio suporte para os filtros anaeróbios, assim como a Figura 5.33 apresenta o gráfico comparativo entre os sistemas propostos. A planilha detalhada encontra-se no Anexo I.

**Tabela 5.8** – Estimativa de custos resumida para implantação do sistema de lodos ativados.

**PLANILHA DE ESTIMATIVA DE CUSTOS LODOS ATIVADOS**

Recepção: 50.000 litros de leite/dia  
Vazão de despejos: 75,0 m<sup>3</sup>/dia

<b>FOLHA RESUMO LODOS ATIVADOS</b>		
<b>ETAPAS</b>		
<b>Item</b>	<b>Discriminação</b>	<b>Valor Total</b>
1.0	Obras civis	164.518,75
2.0	Equipamentos eletro mecânicos	27.910,00
3.0	Diversos	14.747,00
<b>Total geral</b>		<b>207.175,75</b>

**Tabela 5.9** – Estimativa de custos resumida para implantação do filtro anaeróbio 1.

**PLANILHA DE ESTIMATIVA DE CUSTOS DO FILTRO ANAERÓBIO 1**

Recepção de 50.000 litros de leite/dia  
COV = 0,94 kgDQO/m<sup>3</sup>.d  
TDH = 102 h  
Altura do meio suporte = 1,50m

<b>FOLHA RESUMO/FILTRO ANAERÓBIO 1</b>		
<b>ETAPAS</b>		
<b>Item</b>	<b>Discriminação</b>	<b>Valor Total</b>
1.0	Obras civis	136.314,90
2.0	Equipamentos eletro mecânicos	38.350,00
3.0	Diversos	12.120,00
<b>Total geral</b>		<b>186.784,90</b>

**Tabela 5.10** – Estimativa de custos resumida para implantação do filtro anaeróbio 2.

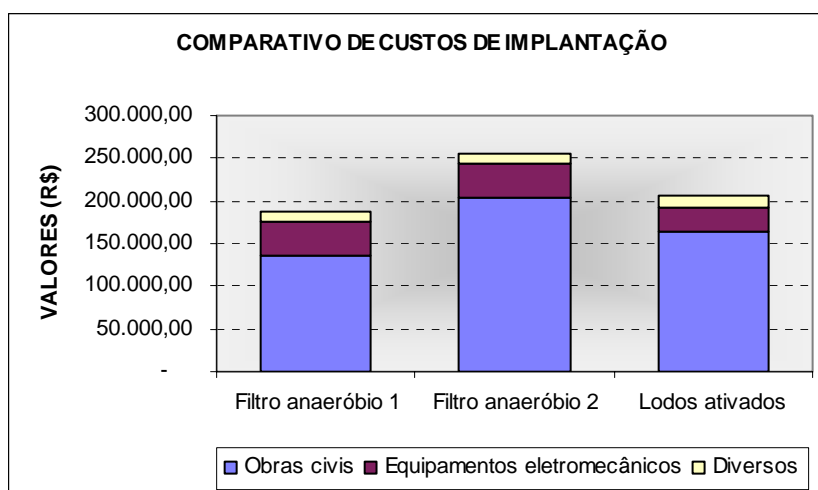
**PLANILHA DE ESTIMATIVA DE CUSTOS DO FILTRO ANAERÓBIO 2**

Recepção de 50.000 litros de leite/dia  
 COV = 0,30 kgDQO/m<sup>3</sup>.d  
 TDH = 157 h  
 Altura do meio suporte = 2,10 m

**FOLHA RESUMO FILTRO ANAERÓBIO 2**

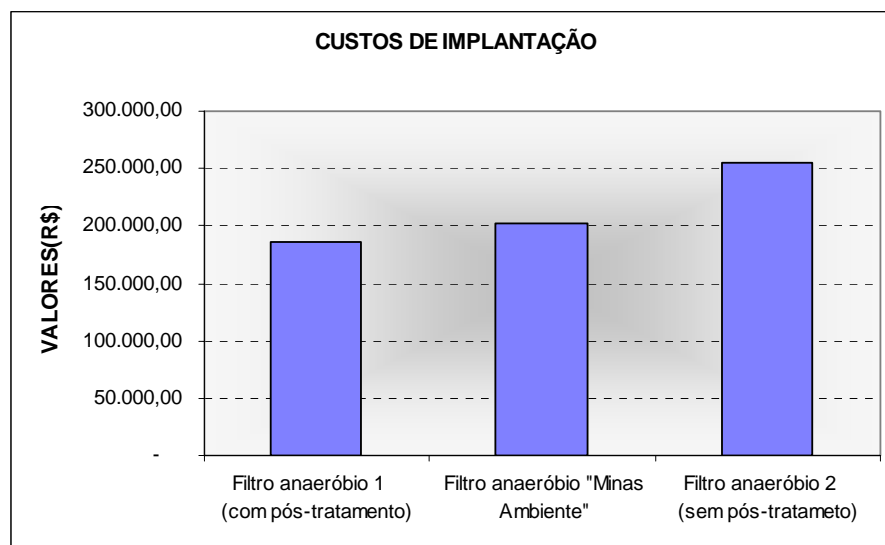
**ETAPAS**

Item	Discriminação	Valor Total
1.0	Obras civis	204.678,45
2.0	Equipamentos eletro mecânicos	38.350,00
3.0	Diversos	12.550,00
<b>Total geral</b>		<b>255.578,45</b>



**Figura 5.33** – Custo de implantação do sistema de filtro anaeróbio e lodos ativados em função das diversas etapas de construção.

Os estudos elaborados para os orçamentos basearam-se nos preços praticados em Belo Horizonte – MG e são apresentados de forma consolidada na Tabela 5.11 e Figura 34. As planilhas detalhadas encontram-se no Anexo I.



**Figura 5.34** – Custo de implantação do sistema de filtro anaeróbio com diversas variáveis

Fonte: adaptado de MACHADO, 2002, Engenho Nove Engenharia Ambiental Ltda.

**Tabela 5.11** – Comparativo de custos de implantação de filtro anaeróbio com duas variáveis.

FILTRO ANAERÓBIO “Minas Ambiente”, 1 e 2					
PARÂMETROS			ESTIMATIVA DE CUSTOS DE CONSTRUÇÃO		
COV (kgDQO/m <sup>3</sup> d)	TDH (horas)	ALT. MEIO SUP. (m)	CUSTOS EM R\$	CUSTOS EM US\$	OBSERVAÇÕES
0,94	102	1,50	202.768,58*	95.645,56***	Filtro Minas Ambiente
			186.784,90**	88.106,09***	Filtro Engenho Nove
0,30	157	2,10	255.578,45**	80.808,23***	Não necessita de unidade de pós-tratamento

Fontes:

\*adaptado de MACHADO, 2002 e atualizado pelo CUB – Custo unitário básico divulgado pelo SINDUSCOM – MG.

\*\* Orçamento fornecido pela empresa Engenho Nove Engenharia Ambiental Ltda, utilizando processo construtivo próprio.

\*\*\* Cotação oficial do Dólar em 18/03/2006. 1,00 US\$ = R\$2,12.

### 5.3.3 Comparativo de custos de implantação de diversos sistemas

Considerando-se que para o enquadramento dos despejos industriais aos padrões de lançamento estabelecidos pela legislação vigente, e que para tal o filtro anaeróbio deverá ser precedido de tratamento preliminar e primário, apresenta-se a seguir estudos de implantação do sistema completo de tratamento, seguido, quando necessário, de unidade de pós tratamento de efluente do filtro anaeróbio, conforme Tabela 5.12 e Figura 5.35.

**Tabela 5.12** – Comparativo de custos de implantação de sistema completo de tratamento de efluentes líquidos industriais com duas variáveis.

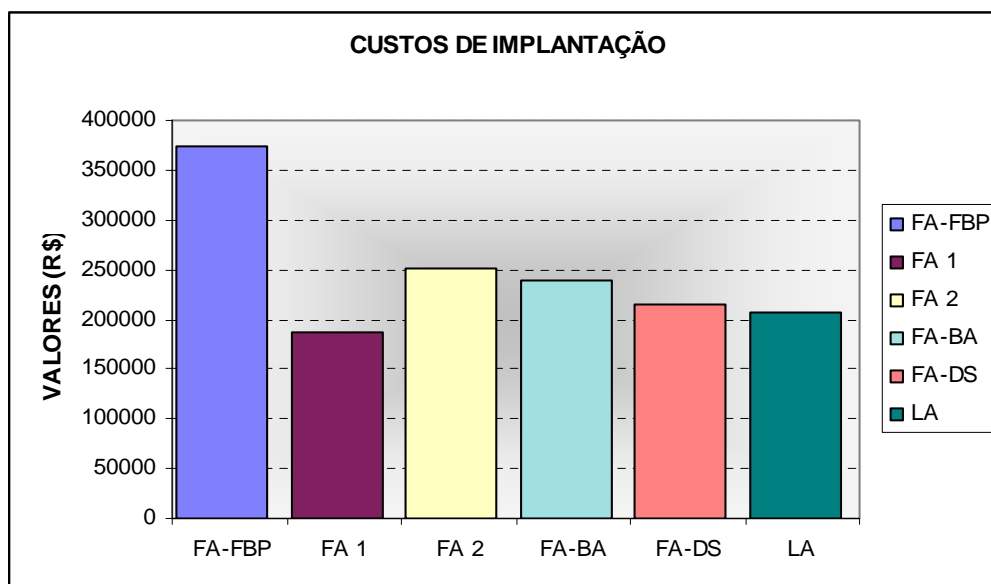
ETE – LATICÍNIOS (Faixa de 40.000 a 60.000 L de leite/dia)							
Parâmetros do filtro anaeróbio			Estimativa de custos de construção por sistema				
COV (kgDQO/m <sup>3</sup> d)	TDH (horas)	ALT. MEIO SUP. (m)	FA - FBP	FA - BAS	FA - DS	LA	FA
0,94	102	1,50	372.892,96*	238.832,14*	215.024,76*	187.142,97* 207.175,75**	186.784,90**
0,30	157	2,10	-	-	-	-	255.578,45**

Legenda: FA – Filtro anaeróbio; FBP – Filtro biológico percolador; BAS – Biofiltro aerado submerso; LA – Lodos ativados; DS – Disposição no solo.

Fontes:

\*adaptado de MACHADO, 2002 e atualizado pelo CUB – Custo unitário básico divulgado pelo SINDUSCOM – MG.

\*\* Orçamento fornecido pela empresa Engenho Nove Engenharia Ambiental Ltda, utilizando processo construtivo próprio.



**Figura 5.35** – Comparativo de custos de implantação de diversos sistemas

Fonte: adaptado de MACHADO, 2002, Engenho Nove Engenharia Ambiental Ltda.

Legenda: FA – Filtro anaeróbio; FBP – Filtro biológico percolador; BA – Biofiltro aerado; DS – Disposição no solo; LA – lodos ativados.

Observa-se que o sistema de lodos ativados convencional é o que apresenta menores custos de implantação, entretanto, sua operação demanda um consumo elevado de energia elétrica e despesas com a destinação final do lodo biológico produzido pelo sistema.

Dentre os 5 sistemas apresentados, o filtro anaeróbio como etapa única de tratamento possui custos de implantação superiores a todos, exceto para o conjunto filtro anaeróbio – filtro biológico percolador (FA-FBP), que em contrapartida não necessita de quaisquer tipos de equipamentos que demandem consumo de energia elétrica.

Não só os custos de implantação, mas também os de operação são fatores determinantes para a tomada de decisão por parte do empreendedor no momento da escolha da modalidade de tratamento de efluentes e para tal torna-se necessário estudar ao longo do tempo, qual dos sistemas é mais econômico.

Apresenta-se a seguir comparativo dos custos de implantação e operação dos sistemas de lodos ativados convencional e filtro anaeróbio para o tratamento de efluentes de laticínios.

### **5.3.4 Comparativo de custos de construção e operação dos sistemas filtro anaeróbio e lodos ativados**

#### Custos globais

A Tabela 5.13 apresenta a comparação entre os custos de implantação (estruturas dos tanques, sistema de aeração por aeradores superficiais no sistema se LA, meio suporte no FA) e operação (consumo de energia para aeração, e transporte e disposição do lodo) das duas alternativas de tratamento. São também apresentados os custos em valor presente, considerando um horizonte de 2,5 e 10 anos e uma taxa de juros de 12% ao ano (ver Figuras 5.36 e 5.37).

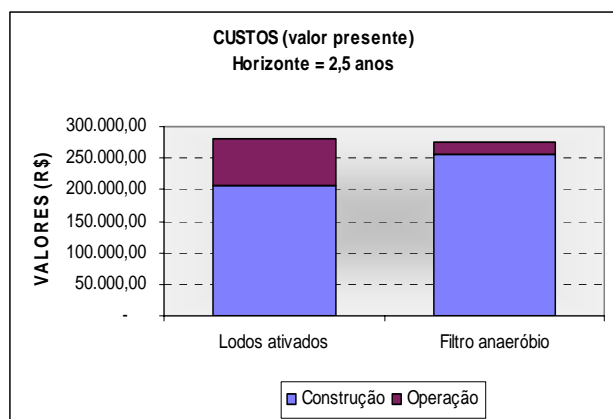
Para a composição dos custos, foram utilizados custos unitários disponibilizados pela empresa Engenho Nove Engenharia Ambiental Ltda., bem como obtidos de projetos recentes com participação do autor. Os principais quantitativos e os custos unitários foram detalhados e são apresentados no Anexo I.

Os itens de custo analisados são apenas aqueles potencialmente diferentes e de relevante influência entre as duas alternativas, não tendo sido computados itens comuns. Portanto, os custos não representam os custos totais a incidirem na implantação e durante a operação.

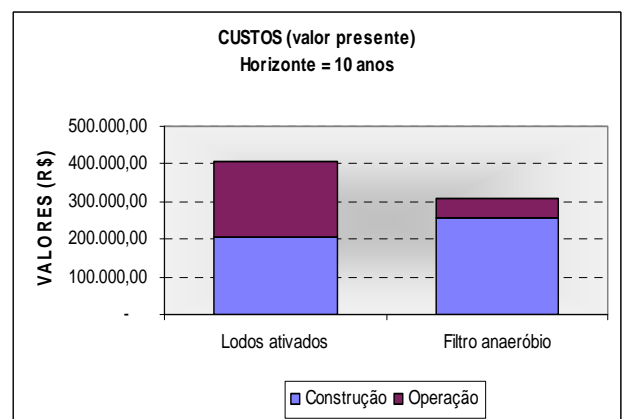
O que se observa ao analisar a Tabela 5.13 é que em pouco mais que dois anos de operação o filtro anaeróbio utilizado como forma única de tratamento de efluentes de laticínios, cujas características se assemelhem ao do empreendimento ora estudado, viabiliza-se economicamente, apesar do seu maior valor de implantação.

**Tabela 5.13** – Comparativo de custos de implantação e operação de sistemas completos de tratamento de efluentes líquidos industriais.

Comparativo de custos (Implantação e operação)							
Sistema	Descrição	Unid.	Quant.	Custos			
				Valor unitário (R\$)	Valor Presente (VP) (R\$)	Projeção de custos para 2,5 anos (VP) (R\$)	Projeção de custos para 10 anos (VP)
Lodos ativados	<b>1.0 Construção</b>	vb	1,00	207.175,75	207.175,75	207.175,75	207.175,75
	<b>2.0 Operação do sistema</b>						
	2.1 Energia elétrica	kWh/ano	112.752	0,17	19.167,84	39.409,50	108.302,57
	2.2 Disposição final de lodo	m <sup>3</sup> /ano	328,50	12,00	3.942,00	8.104,84	22.273,18
	2.3 Mão de obra (operador)	vb/ano	1,00	9.504,00	9.504,00	19.540,43	53.699,72
	2.4 Manutenção em equipamentos	vb/ano	1,00	250,00	3.000,00	6.168,07	16.950,67
	<b>TOTAIS</b>					<b>280.398,59</b>	<b>408.401,89</b>
Filtro anaeróbio	<b>1.0 Construção</b>	vb	1,00	255.728,45	255.578,45	255.578,45	255.578,45
	<b>2.0 Operação do sistema</b>						
	2.1 Energia elétrica	kWh/ano	-	-	-	-	-
	2.2 Disposição final de lodo	m <sup>3</sup> /ano	16,00	12,00	192,00	394,76	1.084,84
	2.3 Mão de obra (operador)	vb/ano	1,00	9.504,00	9.504,00	19.614,45	53.699,72
	2.4 Manutenção em equipamentos	vb/ano	-	-	-	-	-
	<b>TOTAIS</b>					<b>275.587,66</b>	<b>310.363,01</b>



**Figura 5.36** – Comparativo de custos de implantação e operação para um horizonte de 2,5 anos



**Figura 5.37** – Comparativo de custos de implantação e operação para um horizonte de 10 anos

## 6 CONCLUSÕES

O processo de tratamento de efluentes do laticínio avaliado, utilizando filtro anaeróbio, apresentou um bom desempenho, sendo que a eficiência global de remoção de DQO do sistema atendeu de forma satisfatória a legislação vigente no Estado de Minas Gerais.

Em relação ao parâmetro SST, apesar das grandes variações nas concentrações no afluente ao filtro anaeróbio, o sistema mostrou-se eficiente, produzindo sistematicamente um efluente final dentro dos padrões impostos pela DN 10/86 – FEAM-COPAM.

Para o parâmetro óleos e graxas – OG, também o sistema foi capaz de reduzir, de forma constante, suas concentrações em níveis aceitáveis pela legislação vigente no Estado de Minas Gerais, qual seja, abaixo de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  para gorduras de origem animal.

Conclusões específicas sobre os diferentes parâmetros avaliados e a estabilidade do filtro anaeróbio, são apresentadas a seguir:

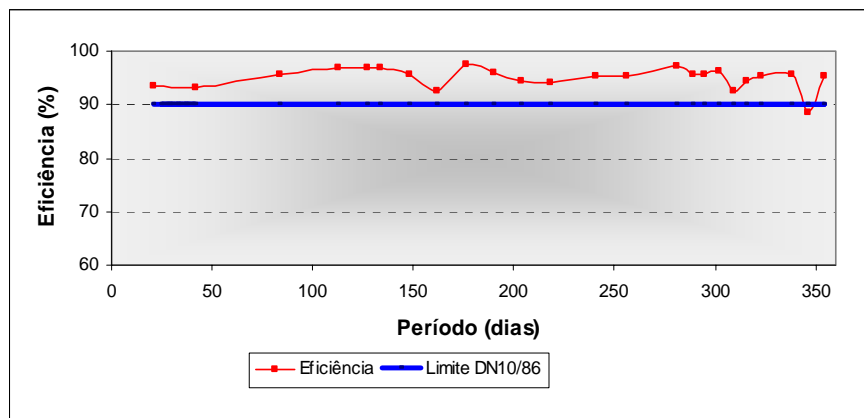
### 6.1 *Eficiência do sistema de tratamento*

- As eficiências médias de remoção de DQO no sistema de tratamento foram de 95%. Cerca de 90% dos resultados de DQO ficaram abaixo do padrão de concentração estabelecido pela DN 10/86 – FEAM/COPAM.
- Para os parâmetros sólidos suspensos totais e óleos e graxas, as concentrações médias atenderam em sua totalidade os requisitos impostos pela legislação, que são de  $100 \text{ mg.L}^{-1}$  para média mensal e  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  para gorduras de origem animal, respectivamente.

### 6.2 *Estabilidade do filtro anaeróbio*

- As concentrações e as eficiências de remoção de DQO filtrada não se alteraram substancialmente já a partir do ponto de amostragem 7, que corresponde aos seguintes parâmetros operacionais do filtro: altura de meio suporte = 0,60; TDH = 76 h; COV =  $0,63 \text{ kgDQO/m}^3 \cdot \text{d}$ . Todavia, resultados excepcionais, em termos de estabilidade do filtro, só foram obtidos a partir do ponto de amostragem 10, que corresponde aos seguintes parâmetros: altura de meio suporte + fundo falso = 2,90m; TDH = 157 h; COV =  $0,30 \text{ kgDQO/m}^3 \cdot \text{d}$ ., conforme visto na Figura 6.1.

- As concentrações de ácidos graxos voláteis no filtro anaeróbio foram muito baixas durante todo o período operacional, indicando a sua rápida conversão em gás metano. Ocorreu, ainda, um predomínio de formação de ácido acético em relação aos demais ácidos, sendo que o ácido propiônico apresentou a segunda maior concentração no filtro anaeróbio e no esgoto bruto, entretanto, mesmo assim, sua formação foi muito baixa.



**Figura 6.1** – Percentis de atendimento à legislação para DQO<sub>t</sub> – Estimada para o ponto 10

### 6.3 Custos de implantação e operação

A decisão de se utilizar somente a fase anaeróbia para o tratamento de efluentes de laticínios em lugar dos tratamentos convencionais, como por exemplo, o de lodos ativados, passa obrigatoriamente pelo conhecimento dos fatores econômicos que envolvem o processo.

Apesar dos custos de implantação do filtro anaeróbio com taxas de aplicações e demais parâmetros mais conservadores (COV, TDH e altura do meio suporte) serem mais elevados, há que se observar que um sistema de tratamento biológico, baseado apenas em filtros anaeróbios, pode apresentar viabilidade econômica frente a sistemas aerados mecanicamente, após poucos anos de operação, a depender dos custos operacionais com energia elétrica, tratamento e disposição final do lodo.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Face aos resultados obtidos na presente pesquisa, recomenda-se:

- A continuidade do estudo com aplicações de diferentes cargas orgânicas volumétricas e tempos de detenção hidráulica, em filtros anaeróbios operando no tratamento de efluentes de laticínios, visando buscar o conhecimento sobre o comportamento do filtro para essas condições.
- A utilização dos seguintes parâmetros de projeto para o dimensionamento de filtro anaeróbio para tratamento de efluentes líquidos gerados em indústrias de laticínios que possuam características similares ao do presente estudo:
  - Altura do meio suporte + fundo falso  $\geq 2,90$  m.
  - Tempo de detenção hidráulica (TDH)  $\geq 157$  horas.
  - Carga orgânica volumétrica (COV) =  $0,30 \text{ kgDQO/m}^3 \cdot \text{d}$ .

## 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, D. R., SCHMID, L. A. *Pilot plant study of an anaerobic filter for treating wastes from a complex slaughterhouse. In: Industrial. Waste Conference, 40., 1985. Proceedings ...* Purdue: Purdue University, 1985.

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

BAKER, S. C. *Comparision of porous and non-porous support media in upflow anaerobic filters.* MSc Dissertation, University of Newcastle upon Tyne, U.K. apud INCE, O., KASAPGIL, B.; DONNELLY, T. Attachment, strength and performance of a porous media in an upflow anaerobic filter treating dairy wastewater. *Water Science & Technology*, V. 41, number 4-5, 2000. p. 261-270.

BECCARI, M., MAJONE, M., RICCARDI C., SAVARESE, F., TORRISI, L. *Integrated treatment of olive oil mill effluents: effect of chemical and physical pretreatment on anaerobic treatability.* *Water Science and Technology*, V. 40, n.1, 1999. p. 347-355.

BLUNDI, C.E. *Aplicação de métodos alternativos para a determinação de matéria orgânica e biomassa em águas residuárias.* 1988. 329 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1988.

CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. *Manual para a fabricação de laticínios*, Belo Horizonte, 1985, 1v. (Série de Publicações Técnicas, 1014)

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Nota técnica: *Tecnologia de controle – Indústrias de laticínios (NT 17)*. São Paulo, 1990. 30p.

CHERNICHARO, C. A. L. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Reatores anaeróbios.* Volume 5. Belo Horizonte: DESA – UFMG, 1997. 246 p.

CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL DE MINAS GERAIS – COPAM. *Legislação do meio ambiente.* Belo Horizonte: COPAM DN 10/1986.

DIGNAC, M. F., GINESTET, P., RYBACKI, D., BRUCHET, A., URBAIN, V., and SCRIBE, P. *Fate of wastewater organic pollution during activated sludge treatment: nature of residual organic matter.* *Water Research*, v. 34, n. 17. 2000. p. 4185-4194.

EPA – Environmental Protection Agency. Dairy food plant wastes and waste treatment practices; USEPA – 12060 EGU 03/71. Washington: EPA, 1971 apud MARSHALL, K. R. e HARPER, W. J. The treatment of wastes from the dairy industry. In: BARNES, D. et al. *Food and allied industries.* London: The Pitman Press, Bath, 1984. v. 1, cap. 5, p. 296 -376.

EPA – Environmental Protection Agency. Technology Transfer Seminar. March, 1973.

EPA – Environmental Protection Agency. Dairy product processing; EPA – 440/1-74-021-a. Washington: EPA, 1974. 167 p.

FLORÊNCIO, L. *The fate of methanol in anaerobic bioreactors.* (Thesis). Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1994. 136 p.

GUTIERREZ, S., HERN A., VI, M. *Mechanism of degradation of wool wax in the anaerobic treatment of woolscouring wastewater*. Water Science and Technology, v. 40, n. 8, 1999. p. 17-23.

HANAKI, H. et al. *Mechanism of inhibition caused by long chain fatty acids in anaerobic digestion processes*. Biotechnol. Bioeng. V. 23, 1981. p. 1591-1610.

INCE, O., KASAPGIL, B.; DONNELLY, T. *Attachment, strength and performance of a porous media in an upflow anaerobic filter treating dairy wastewater*. Water Science & Technology, V. 41, number 4-5, 2000. p. 261-270.

INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION – IDF. *Dairy effluents: legislation on water conservation – water to milk ratios – BOD, COD and TOC relationships; Document 138 (Bulletin)*. Brussels: IDF, 1981. p. 16.

JORDÃO, E. P. e PESSOA, C. A. *Tratamento de esgotos doméstico*. 3ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 720 p.

KASAPGIL, B.; ANDERSON, G. K.; INCE, O. *An investigation into the pre-treatment of dairy wastewater prior to aerobic biological treatment*. Water Science & Technology, V. 29, number 9, 1994. pp. 205-212.

LAUBSCHER, A C. J., WENTZEL, M.C., LE ROUX, J.M.W. EKAMA, G.A *Treatment of grain distillation wastewater in an upflow anaerobic sludge bed (UASB) system*. Water S.A , v. 27, n. 4, 2001. p. 433- 444.

LETTINGA, G. *Anaerobic wastewater treatment*. In: Seminário internacional tendências no tratamento simplificado de águas residuárias domésticas e industriais, 1996, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental -UFMG, 1996. p. 107-126.

LETTINGA, G., HULSHOF POL, L. W., ZEEMAN, G. *Biological Wastewater Treatment*. Part I: Anaerobic wastewater treatment. Lecture Notes. Wageningen Agricultural University, ed. January, 1996.

LETTINGA, G. Introduction. In: International course on anaerobic treatment. Wageningen: Wageningen Agricultural University/IHE Delft, 1995 apud CHERNICHARO, C.A.L, *Reatores anaeróbios*. 1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 1997. 246 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.V.5).

MACHADO, R. M. G.; FREIRE, V. H.; SILVA, P. C.; FIGUEIRÊDO, D. V.; FERREIRA, P. *Controle ambiental nas pequenas e médias indústrias de laticínios: Projeto minas ambiente*. Belo Horizonte: Segrac Editora e Gráfica Ltda, 2002. p. 223.

MARSHALL, K. R. e HARPER, W. J. *The treatment of wastes from the dairy industry*. In: BARNES, D. et al. *Food and allied industries*. London: The Pitman Press, Bath, 1984. v. 1, cap. 5, p. 296 -376.

MCCARTY, P.L. *Anaerobic waste treatment fundamentals*. Public Works – Parts 1, 2, 3 and 4. v. 95, 1964 apud CHERNICHARO, C.A.L, *Reatores anaeróbios*. 1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 1997. 246 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.V.5).

MCINERNEY, M.J. *Anaerobic hydrolysis of fats and proteins*. In: Zehnder, A.J.B. Editor, *Biology of Anaerobic Micro-organism*. New York: John Wiley and Sons, 1988. p. 2227-2239.

METCALF, E., EDDY, M. *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 3rd edição. New York: McGraw-Hill Inc., 1991. 1334 p.

MINAS AMBIENTE/CETEC. *Pesquisa tecnológica para o controle ambiental em pequenos e médios laticínios de Minas Gerais: Estado da arte – processo industrial*. V. 2. Belo Horizonte, 1998. 112 p.

MIRON, Y., ZEEMAN, G., VAN LIER, J. B., LETTINGA, G. *The role of sludge retention time in the hydrolysis and acidification of lipids, carbohydrates and proteins during digestion of primary sludge*. In CSTR systems, *Water Research*, V.34, 2000. 1705-1713. p.

NASCIMENTO, M.C.P., CHERNICHARO, C.AL., GARCIA, P.B.S. *Avaliação de filtros biológicos aeróbios como pós-tratamento de efluentes de reatores UASB*. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 9., 2000, Porto Seguro. Anais... Porto Seguro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

PONTES, P.P., CHERNICHARO, C.AL., PORTO, M.T.R. *Perfil de decaimento da concentração de ácidos graxos voláteis em um reator UASB utilizado para o tratamento de esgoto sanitário e operando sob diferentes tempos de detenção hidráulica*. In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ambiental , 18, 2002, Cancun, México. Proceedings... Cancun: AIDIS, 2002.

SAMSON, R., VAN DER BERG, B., PETERS, R., HADE, C. *Dairy wastewater treatment using industrial-scale fixed-film and upflow sludge bed anaerobic digesters: design and start-up experience*. In: *Industrial Waste Conference*, 40, 1985, Purdue. Proceedings...Purdue: Purdue University, 1985.

SEBRAE/MG. *Diagnóstico da indústria de laticínio do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 1997. 270 p.

SOUBES, M. *Microbiologia de la digestion anaerobia*. In: Taller y Seminario Latinoamericano: tratamiento anaerobio de aguas residuales, 3, 1994, Montevideo, Uruguay. Anais... Montevideo: AIDIS, 1994, p. 15-28, apud CHERNICHARO, C.A.L, *Reatores anaeróbios*. 1.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 1997. 246 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.V.5).

SPEECE, R.E. Proc. EWPCA Conf. Anaerobic treatment, a grown-up technology, September, Amsterdam, 205 p., 1986.

STRYDOM, J. P. et al. *Two-phase anaerobic digestion of three different dairy effluents using a hybrid bioreactor*. *Water SA*, V. 23, n. 2, 1997. 151 – 155 p.

TORRES, C. C. *Bebidas à base de soro de queijo: caracterização físico-química, microbiológica e sensorial*. Tese de mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. Mg. 1988. 117 p.

UGURLU, A. FOSTER, C. F. *Thermophilic treatment of ice-cream wastes: A comparison of porous and non-porous support media*. *Trans. I. Chem. E.*, 69, B, 1991. p. 37-42 apud INCE, O., KASAPGIL, B.; DONNELLY, T. Attachment, strength and performance of a porous

media in an upflow anaerobic filter treating dairy wastewater. *Water Science & Technology*, V. 41, number 4-5, 2000. 261-270. p.

VAN HAANDEL, A.C., LETTINGA, G. *Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para países de clima quente*, Campina Grande: Epgraf, 1994. apud CHERNICHARO, C.A.L, *Reatores anaeróbios*. 1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 1997. 246 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. V. 5).

VAN HAANDEL, A.C., LETTINGA, G. *Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para países de clima quente*. Campina Grande: Epgraf, 1994.

VAN LIER, J.B. *Thermofilic anaerobic wastewater treatment; temperature aspects and process stability*. (Thesis). Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1995. 179 p.

VIDAL, G., CARVALHO, A., MENDEZ, R., LEMA, J. M. *Influence of the content of fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewater*. *Bioresource Technology*, v. 74, 2000. p. 231-239.

VISSER, A. *Anaerobic treatment of sulphate containing wastewater*. In International course on anaerobic treatment. Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1995.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Volume 1. Belo Horizonte: DESA – UFMG, 1995. 240 p.

VON SPERLING, M. *Lodos ativados*. Volume 4. Belo Horizonte: DESA – UFMG, 1997. 416 p.

YOUNG, J. C., YANG B.S. *Design considerations for full-scale anaerobic filters*. *Journal WPCF*, v. 61, n. 9, 1989. p. 1576-1577.

## 9 ANEXOS

### 9.1 Anexo I

#### 9.1.1 Detalhamento das planilhas de custos – Filtro anaeróbio 1

Folha resumo		
Recepção de 50.000 litros de leite/dia COV = 0,94 kgDQO/m <sup>3</sup> .d TDH = 102 h Altura do meio suporte = 1,50 m		
FOLHA RESUMO/FILTRO ANAERÓBIO 1		
ETAPAS		
Item	Discriminação	Valor Total
1.0	Obras civis	136.314,90
2.0	Equipamentos eletro mecânicos	38.350,00
3.0	Diversos	12.120,00
<b>Total geral</b>		<b>186.784,90</b>

DETALHAMENTO DA PLANILHA DE ESTIMATIVA DE CUSTOS					
Data:10/03/2006					
ETAPAS				PREÇOS	
Item	Discriminação	Unid.	Quant.	Unit.	Total
<b>1.0</b>	<b>OBRAS CIVIS</b>				
<b>1.1</b>	<b>INSTALAÇÃO DA OBRA</b>				
1.1.1	Limpeza e nivelamento do terreno	m <sup>3</sup>	480,00	5,50	2.640,00
1.1.2	Locação da obra	vb	1,00	680,00	680,00
<b>1.2</b>	<b>TERRAPLENAGEM</b>				
1.2.1	Escavação, carga e transporte de material de 1º categoria	m <sup>3</sup>	936,00	10,50	9.828,00
<b>1.3</b>	<b>EQUALIZADOR</b>				
1.3.1	Construção em concreto rampado Fck >20,0 MPa	vb	1,00	12.550,00	12.550,00
<b>1.4</b>	<b>FILTRO ANAERÓBIO</b>				
1.4.1	Fornecimento e aplicação de meio suporte (brita nº 4)	m <sup>3</sup>	372,00	37,00	13.764,00
1.4.2	Fornecimento e aplicação de concreto Fck >20,0 MPa	m <sup>3</sup>	55,80	850,00	47.430,00
1.4.3	Fornecimento e aplicação laje pré-moldada	m <sup>2</sup>	91,20	42,50	3.876,00
1.4.4	Aço CA 60A, corte, dobra e armação (taxa de aço = 87 kg/m <sup>3</sup> )	kg	4.850,00	4,50	21.825,00
1.4.5	Fôrma em madeirite e=14 mm	m <sup>2</sup>	214,50	55,20	11.840,40
1.4.6	Impermeabilização com manta asfáltica e=3,0mm, soldada a fogo	m <sup>2</sup>	307,00	14,50	4.451,50
1.4.7	Execução de caixa distribuidora de fluxo	vb	1,00	2.880,00	2.880,00
<b>1.5</b>	<b>PENEIRA ESTÁTICA</b>				
1.5.1	Fornecimento e instalação de PE 20 em aço inoxidável	vb	1,00	4.550,00	4.550,00
<b>TOTAL DO ITEM</b>					<b>136.314,90</b>

**DETALHAMENTO DA PLANILHA DE ESTIMATIVA DE CUSTOS**

Data:10/03/2006

<b>ETAPAS</b>		<b>PREÇOS</b>			
<b>Item</b>	<b>Discriminação</b>	<b>Unid.</b>	<b>Quant.</b>	<b>Unit.</b>	<b>Total</b>
<b>2.0</b>	<b>EQUIPAMENTOS ELETROMECAˆNICOS</b>				
<b>2.1</b>	<b>SISTEMA DE FLOTAˆO</b>				
2.1.1	Flotador em aˆo carbono SAE 1040	vb	1,00	18.000,00	18.000,00
2.1.2	Cˆmara de saturaˆo em aˆo carbono SAE 1040	vb	1,00	9.600,00	9.600,00
2.1.3	Painel pneumˆtico de controle de vazˆo e reduˆo de pressˆo	vb	1,00	3.850,00	3.850,00
<b>2.2</b>	<b>CONJUNTO MOTO BOMBA</b>				
2.2.1	Fornecimento e instalaˆo de conjunto moto bomba	vb	2,00	3.450,00	6.900,00
	<b>TOTAL DO ITEM</b>				<b>38.350,00</b>
<b>3.0</b>	<b>DIVERSOS</b>				
<b>3.1</b>	<b>INSTALAˆOES HIDRˆULICAS</b>				
3.1.1	Drenos superiores do filtro	vb	1,00	3.820,00	3.820,00
3.1.2	Interligaˆoes dos elementos	vb	1,00	3.600,00	3.600,00
3.1.3	Medidor de vazˆo tipo "Thompson"	vb	1,00	850,00	850,00
<b>3.2</b>	<b>INSTALAˆOES ELˆTRICAS</b>				
3.2.1	Fornecimento e instalaˆo de painel de comando	vb	1,00	3.850,00	3.850,00
	<b>TOTAL DO ITEM</b>				<b>12.120,00</b>

**9.1.2 Detalhamento das planilhas de custos – Filtro anaerˆbio 2****Folha resumo**

Recepˆo de 50.000 litros de leite/dia

COV = 0,30 kgDQO/m<sup>3</sup>.d

TDH = 157 h

Altura do meio suporte = 2,10 m

**FOLHA RESUMO/FILTRO ANAERˆBIO 2****ETAPAS**

<b>Item</b>	<b>Discriminaˆo</b>	<b>Valor Total</b>
1.0	Obras civis	204.678,45
2.0	Equipamentos eletro mecˆnicos	38.350,00
3.0	Diversos	12.550,00
	<b>Total geral</b>	<b>255.578,45</b>

**DETALHAMENTO DA PLANILHA DE ESTIMATIVA DE CUSTOS**

Data:10/03/2006

Item	ETAPAS		PREÇOS		
	Discriminação	Unid.	Quant.	Unit.	Total
<b>1.0</b>	<b>OBRAS CIVIS</b>				
<b>1.1</b>	<b>INSTALAÇÃO DA OBRA</b>				
1.1.1	Limpeza e nivelamento do terreno	m <sup>3</sup>	600,00	5,50	3.300,00
1.1.2	Locação da obra	vb	1,00	680,00	680,00
<b>1.2</b>	<b>TERRAPLENAGEM</b>				
1.2.1	Escavação, carga e transporte de material de 1º categoria	m <sup>3</sup>	1.170,00	10,50	12.285,00
<b>1.3</b>	<b>EQUALIZADOR</b>				
1.3.1	Construção em concreto rampado	vb	1,00	12.550,00	12.550,00
<b>1.4</b>	<b>FILTRO ANAERÓBIO</b>				
1.4.1	Fornecimento e aplicação de meio suporte (brita nº 4)	m <sup>3</sup>	520,00	37,00	19.240,00
1.4.2	Fornecimento e aplicação de concreto Fck >20,0 MPa	m <sup>3</sup>	97,72	850,00	83.062,00
1.4.3	Fornecimento e aplicação laje pré-moldada	m <sup>2</sup>	129,70	42,50	5.512,25
1.4.4	Aço CA 60A, corte, dobra e armação (taxa de aço = 85 kg/m <sup>3</sup> )	kg	8.306,00	4,50	37.377,00
1.4.5	Fôrma em madeirite e=14 mm	m <sup>2</sup>	306,00	55,20	16.891,20
1.4.6	Impermeabilização com manta asfáltica e=3,0mm, soldada a fogo	m <sup>2</sup>	438,00	14,50	6.351,00
1.4.7	Execução de caixa distribuidora de fluxo	vb	1,00	2.880,00	2.880,00
<b>1.5</b>	<b>PENEIRA ESTÁTICA</b>				
1.5.1	Fornecimento e instalação de PE 20 em aço inoxidável	vb	1,00	4.550,00	4.550,00
	<b>TOTAL DO ITEM</b>				<b>204.678,45</b>
<b>2.0</b>	<b>EQUIPAMENTOS ELETROMECÂNICOS</b>				
<b>2.1</b>	<b>SISTEMA DE FLOTAÇÃO</b>				
2.1.1	Flotador em aço carbono SAE 1040	vb	1,00	18.000,00	18.000,00
2.1.2	Câmara de saturação em aço carbono SAE 1040	vb	1,00	9.600,00	9.600,00
2.1.3	Painel pneumático de controle de vazão e redução de pressão	vb	1,00	3.850,00	3.850,00
<b>2.2</b>	<b>CONJUNTO MOTO BOMBA</b>				
2.2.1	Fornecimento e instalação de conjunto moto bomba	vb	2,00	3.450,00	6.900,00
	<b>TOTAL DO ITEM</b>				<b>38.350,00</b>
<b>3.0</b>	<b>DIVERSOS</b>				
<b>3.1</b>	<b>INSTALAÇÕES HIDRÁULICAS</b>				
3.1.1	Drenos superiores do filtro	vb	1,00	4.250,00	4.250,00
3.1.2	Interligações dos elementos	vb	1,00	3.600,00	3.600,00
3.1.3	Medidor de vazão tipo "Thompson"	vb	1,00	850,00	850,00
<b>3.2</b>	<b>INSTALAÇÕES ELÉTRICAS</b>				
3.2.1	Fornecimento e instalação de painel de comando	vb	1,00	3.850,00	3.850,00
	<b>TOTAL DO ITEM</b>				<b>12.550,00</b>

### 9.1.3 Detalhamento das planilhas de custos – Lodos ativados

#### Folha resumo

Recepção de 50.000 litros de leite/dia  
Vazão de efluentes= 75m<sup>3</sup>/d

#### FOLHA RESUMO/LODOS ATIVADOS

##### ETAPAS

Item	Discriminação	Valor Total
1.0	Obras civis	164.518,75
2.0	Equipamentos eletro mecânicos	27.910,00
3.0	Diversos	14.747,00
<b>Total geral</b>		<b>207.175,75</b>

#### DETALHAMENTO DA PLANILHA DE ESTIMATIVA DE CUSTOS

Data:10/03/2006

Item	Discriminação	Unid.	Quant.	PREÇOS	
				Unit.	Total
<b>1.0</b>	<b>OBRAS CIVIS</b>				
<b>1.1</b>	<b>REATOR AERÓBIO</b>				
1.1.1	Terraplenagem	m <sup>3</sup>	584,00	10,50	6.132,00
1.1.2	Fôrma em madeirite e=14 mm	m <sup>2</sup>	295,00	55,20	16.284,00
1.1.2	Concreto Fck 20,0 MPa, fornecimento, adensamento e aplicação	m <sup>3</sup>	25,60	850,00	21.760,00
1.1.3	Aço CA 60A, corte, dobra e armação (taxa de aço = 150 kg/m <sup>3</sup> )	kg	3.850,00	4,50	17.325,00
1.1.4	Impermeabilização com manta asfáltica, soldada a fogo, e= 3,0mm	m <sup>2</sup>	496,00	14,50	7.192,00
1.1.5	Execução de estrutura de fixação dos aeradores	vb	1,00	3.192,00	3.192,00
<b>1.2</b>	<b>DECANTADOR PRIMÁRIO</b>				
1.2.1	Terraplenagem	m <sup>3</sup>	126,30	10,50	1.326,15
1.2.2	Fôrma em madeirite e=14 mm	m <sup>2</sup>	135,00	55,20	7.452,00
1.2.3	Concreto Fck 20,0 MPa, fornecimento, adensamento e aplicação	m <sup>3</sup>	19,80	850,00	16.830,00
1.2.4	Aço CA 60A, corte, dobra e armação (taxa de aço = 150 kg/m <sup>3</sup> )	kg	2.620,00	4,50	11.790,00
1.2.5	Impermeabilização com manta asfáltica, soldada a fogo, e= 3,0mm	m <sup>2</sup>	120,40	14,50	1.745,80
1.2.6	Execução de calha coletora	un.	1,00	5.280,00	5.280,00
<b>1.3</b>	<b>DECANTADOR SECUNDÁRIO</b>				
1.3.1	Terraplenagem	m <sup>3</sup>	142,40	10,50	1.495,20
1.3.2	Fôrma em madeirite e=14 mm	m <sup>2</sup>	164,00	55,20	9.052,80
1.3.3	Concreto Fck 20,0 MPa, fornecimento, adensamento e aplicação	m <sup>3</sup>	21,30	850,00	18.105,00
1.3.4	Aço CA 60A, corte, dobra e armação (taxa de aço = 150 kg/m <sup>3</sup> )	kg	3.260,00	4,50	14.670,00
1.3.5	Impermeabilização com manta asfáltica, soldada a fogo, e= 3,0mm	m <sup>2</sup>	138,40	14,50	2.006,80
1.3.6	Execução de calha coletora	un.	1,00	6.072,00	6.072,00
<b>TOTAL DO ITEM</b>					<b>164.518,75</b>

**DETALHAMENTO DA PLANILHA DE ESTIMATIVA DE CUSTOS**

Data:10/03/2006

ETAPAS		PREÇOS			
Item	Discriminação	Unid.	Quant.	Unit.	Total
<b>2.0</b>	<b>EQUIPAMENTOS ELETROMECÂNICOS</b>				
<b>2.1</b>	<b>CONJUNTO MOTO BOMBA</b>				
2.1.1	Conjunto moto bomba centrífugo de rotor aberto, vazão 6,5 m <sup>3</sup> /h, altura manométrica 5 mca (recirculação de lodo)	vb	2,00	3.550,00	7.100,00
2.1.2	Conjunto moto bomba centrífugo de rotor aberto, vazão 6,5 m <sup>3</sup> /h, altura manométrica 10 mca (recirculação de lodo)	vb	2,00	4.125,00	8.250,00
<b>2.2</b>	<b>SISTEMA DE AERAÇÃO</b>				
2.2.1	Fornecimento e instalação de aerador superficial de fluxo descendente, potência 10 cv	un.	1,00	12.560,00	12.560,00
	<b>TOTAL DO ITEM</b>				<b>27.910,00</b>
<b>3.0</b>	<b>DIVERSOS</b>				
<b>3.1</b>	<b>INSTALAÇÕES ELÉTRICAS</b>				
3.1.1	Fornecimento e instalação de painel de comando elétrico	vb	1,00	4.112,00	4.112,00
<b>3.2</b>	<b>REMOÇÃO DE SÓLIDOS GROSSEIROS/MEDIDORES DE</b>				
3.2.1	Fornecimento e instalação de grade metálica	vb	1,00	855,00	855,00
3.2.2	Fornecimento e instalação calha Parshall 3"	vb	2,00	1.515,00	3.030,00
<b>3.3</b>	<b>INSTALAÇÕES HIDRÁULICAS</b>				
3.3.1	Fornecimento e execução de redes de recalque e escoamento em PVC	vb	1,00	6.750,00	6.750,00
	<b>TOTAL DO ITEM</b>				<b>14.747,00</b>