

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

André Luiz Iannicelli

**REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE UMA
INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

Taubaté - SP

2008

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

André Luiz Iannicelli

**REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE UMA
INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

Dissertação apresentada para a obtenção do
Título de Mestre pelo Curso de Engenharia
Mecânica do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Energia e Gestão
Ambiental na Indústria
Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo

Taubaté - SP

2008

**Ficha catalográfica elaborada pelo
SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU**

I117r Iannicelli, André Luiz
 Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira /
 André Luiz Iannicelli. - 2008.
 83f. : il.

 Dissertação (mestrado) - Universidade de Taubaté, Departamento de
 Engenharia Mecânica, 2008.
 Orientação: Prof. Dr. José Rui Camargo, Departamento de
 Engenharia Mecânica.

 1. Biogás. 2. Cervejaria. 3. Efluente. 4. Energia. I. Título.

ANDRÉ LUIZ IANNICELLI

**REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE UMA INDÚSTRIA
CERVEJEIRA**

Dissertação apresentada para a obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Energia e Gestão Ambiental na Indústria

Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Rui Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Carlos Alberto Chaves

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Carlos Daniel Ebinuma

Universidade Estadual Paulista

Assinatura _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e amigos, em especial para minha esposa Juliana Rodrigues Iannicelli, meus filhos Bruno Rodrigues Iannicelli e Miguel Rodrigues Iannicelli, e também para minha mãe Luiza Adete Gonçalves Iannicelli, que tiveram muita paciência e me deram muito apoio nesta fase de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha disposição e vontade para enfrentar os desafios;

A toda minha família por dividir meus anseios e preocupações;

Ao corpo de professores do programa de mestrado por todo o conhecimento passado e pela ajuda durante o desenvolvimento do trabalho;

A Cervejarias Kaiser Brasil SA de Jacareí, em nome das pessoas que facilitaram o acontecimento deste curso de mestrado, principalmente o Sr. João Roberto Arizono, Candido Augusto Menconi, João Carlos Rodrigues e Argemiro Campos por todo apoio técnico e incentivo financeiro;

Ao aluno Diego Mendes Hamzagic que desenvolveu outro trabalho de aproveitamento de biogás na mesma Cervejaria e contribuiu com informações técnicas sobre o tema estudado bem como as análises de pureza do biogás.

A Empresa ENIPLAN Brasil, principalmente o Sr. Lourenço pelas informações sobre a planta de recuperação e purificação dos gases;

Agradeço ao Professor Sebastião Cardoso pela instrução, ajuda técnica e apoio no desenvolvimento deste trabalho e principalmente ao Orientador Professor José Rui Camargo que assumiu apoiar o desenvolvimento do meu trabalho.

RESUMO

O homem ao promover o desenvolvimento industrial e tecnológico, tem contribuído para a degradação ambiental. Hoje a sociedade está diante do maior desafio das últimas décadas, pois, para dar prosseguimento a esse modelo de desenvolvimento, haverá aumento no consumo de energia, que é altamente poluente, e cujas fontes estão prestes ao esgotamento. A racionalização do uso das energias convencionais e a utilização de energias não poluentes podem representar o caminho a ser seguido, porém a substituição de parcela relevante dessa energia demanda muita pesquisa e tempo. Este trabalho apresenta uma alternativa para aproveitamento do biogás gerado em uma estação de tratamento de efluentes de uma cervejaria, que utiliza o processo anaeróbio para efetuar o tratamento, visto que a alta geração de carga orgânica consiste em uma das principais características para o tratamento de afluentes deste tipo de indústria. O estudo permite fazer uma comparação sócio-ambiental e econômica, entre a atual utilização do biogás, caracterizado como uma fonte de energia primária que é queimado diretamente na atmosfera, e a nova utilização proposta na qual o biogás será armazenado e utilizado como combustível em máquinas térmicas. A energia gerada pelas máquinas térmicas é destinada à indústria que deixará de comprar o equivalente de fornecedores externos. O projeto contempla ainda ganhos financeiros com o atual comércio de créditos de carbono e se executado com êxito pela indústria atrairá ganhos ambientais, sociais e econômicos.

Palavras Chave: Biogás. Cervejaria. Efluente. Energia.

ABSTRACT

The man to promote the industrial and technological development, has contributed to environmental degradation. Today the company is facing the biggest challenge in decades, to further the development of this model, there will be increase in energy consumption, which are highly polluting, and whose sources are about to exhaustion. The rationalization of the use of conventional energy and the use of clean energy may represent the path to be followed, but the replacement of relevant portion of this energy demand a lot of research and time. This paper presents an alternative for use of biogas generated on a sewage treatment station of a brewery, which uses the anaerobic process to make the treatment, since the generation of high organic load is a key feature for the treatment of tributaries this type of industry. The study allows to compare environmental and socio-economic, between the actual use of biogas, characterized as a primary energy source that is burned directly in the atmosphere, and use new proposal in which the biogas will be stored and used as fuel in thermal machines. The energy generated by thermal machines for the industry that will no longer buy the equivalent of external suppliers. The project also includes financial gains with the current trade in carbon credits and if successfully implemented by the industry earned attract environmental, social and economic.

Key Words: Biogás. Brewery. Wastewater. Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios	23
Figura 02 – Digestão anaeróbia como tecnologia de integrada de tratamento de esgotos e de recuperação de subprodutos	24
Figura 03 – Esquema simplificado da digestão anaeróbia com os compostos resultantes	25
Figura 04 – Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia	27
Figura 05 – Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia com redução de sulfato	32
Figura 06 – Rotas de Formação de Metano a partir da fermentação de substratos complexos	34
Figura 07 – Esquemas de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo	38
Figura 08 – Desenho esquemático do reator anaeróbio UASB	40
Figura 09 – Foto Empilhadeira movido à GLP	57
Figura 10 – Foto Caldeira para Geração de Vapor movida à Gás Natural	61
Figura 11 – Foto da Turbina e Caldeira do Sistema de Cogeração de Energia Elétrica e Térmica movido à Gás Natural	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Vantagens e Desvantagens dos Processos Anaeróbios	21
Tabela 02 – Algumas reações de oxiredução importantes na digestão anaeróbia	34
Tabela 03 – Principais etapas do gerenciamento do lodo	44
Tabela 04 – Etapas do gerenciamento de lodo e principais processos utilizados	45
Tabela 05 – Composição média biogás	47
Tabela 06 – Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás	48
Tabela 07 – Comparação PCI biogás com outros gases	48
Tabela 08 – Equivalência energética biogás	49
Tabela 09 – Densidade dos gases em estudo	50
Tabela 10 – Poder Calorífico dos Gases em estudo	50
Tabela 11 – Relação dos Volumes dos Gases e Poder Calorífico comparado ao Biogás	51
Tabela 12 – Volume de Biogás e Lodo Gerado	52
Tabela 13 – Média de Valores Encontrados em Análise	53
Tabela 14 – Margens Máximas para Cálculo de Gás Natural	66
Tabela 15 – Comparação de Custos entre Projetos	68
Tabela 16 – Base de Preços dos Custos dos Combustíveis e Energia Elétrica	69
Tabela 17 – Dados de Vazão do Biogás Gerado e Produção de Energia Elétrica	69
Tabela 18 – Potencial de Aquecimento Global	76

LISTA DE SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
AME	Atividade Metanogênica Específica
CEE	Comunidade Econômica Européia
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – São Paulo
CFR	Federal Regulations Code (Código de Regulamentos Federais)
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
DQO	Demanda bioquímica de oxigênio
DBO	Demanda Biológica de oxigênio
DEHNR	North Carolina Department of Environment, Helth and Natural Resources
DHEC	Department of Health and Environmental Control – South Carolina
ETE	Estação de tratamento de efluentes
EPA	Environmental Protect Agency
GEE	Gases do Efeito Estufa
MDL	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
M.O.	Matéria Orgânica
PCB	Policlorados de Bifenilas
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCD	Dioxinas
PCDF	Furanos
PFRP	Do inglês – Processos de Redução Adicional de Patógenos
PSRP	Do inglês – Processos de Redução Significativas de Patógenos
RAC	Relação ar combustível
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
ST	Sólidos Totais
TOX	Halogenados Orgânicos Absorvíveis
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
USEPA	United States Environmental Protect Agency

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{EE} = Custo da Energia Elétrica (R\$)

C_{GLP} = Custo do gás liquefeito de petróleo (R\$)

C_{GN} = Custo do gás natural (R\$)

C_{P1} = Custo do Projeto 01 (R\$)

C_{P2} = Custo do Projeto 02 (R\$)

C_{P3} = Custo do Projeto 03 (R\$)

C_{P4} = Custo do Projeto 04 (R\$)

d = densidade (kg/m^3)

E_{B-EE} = Equivalência biogás – energia elétrica (Item 6.4.2)

E_{B-GLP} = Equivalência biogás – gás liquefeito de petróleo

E_{B-GN} = Equivalência biogás – gás natural

m = massa (kg)

Q_{BA} = Vazão do biogás gerado por ano (m^3)

Q_{BxGLP} = Vazão do biogás convertido em GLP (m^3)

Q_{BxGN} = Vazão do biogás convertido em GN (m^3)

R_{BxEE} = Receita do biogás comparado à redução no consumo de energia elétrica (R\$)

R_{BxGLP} = Receita do biogás comparado ao GLP (R\$)

R_{BxGN} = Receita do biogás comparado ao GN (R\$)

v = volume (m^3)

$V_{\text{Biogás}}$ = Volume biogás

V_{BxEE} = Valor do biogás convertido em energia elétrica (kWh)

V_{GLP} = Volume GLP

V_{GN} = Volume Gás Natural

SUMÁRIO

1. Introdução	14
1.1. Processo de Fabricação da Cerveja	16
1.2. História da Cerveja	16
1.3. Fases de Produção de Cerveja	17
1.4. A Composição do Afluente do Processo de Fabricação de Cerveja	18
1.5. O Fluxograma de uma Estação de Tratamento de Efluentes de Cervejaria	19
2. Reatores Anaeróbios	20
2.1. Despejos Passíveis de Serem Tratados Por Via Anaeróbia	20
2.2. Características dos Processos Anaeróbios	21
2.3. Fundamentos da Digestão Anaeróbia	23
2.3.1. Microbiologia da Digestão Anaeróbia	25
2.3.2. Bioquímica da Digestão Anaeróbia	31
2.3.3. Ácidos Voláteis Intermediários	33
2.3.4. Aspectos Termodinâmicos	34
2.3.5. Formação de Metano	35
2.4. Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB)	37
2.4.1. Princípios do Processo	39
3. Lodo	41
3.1. Produção de Lodo nos Sistemas de Tratamento de Esgotos	42
3.2. Processamento do Lodo	45
4. Biogás	47
4.1. Características do Biogás	48
4.2. Cálculos para comparação dos gases em estudo	51
4.3. Utilização do Biogás em Motogeradores	52
5. Materiais e Métodos	52
6. Descrição de Projeto e Cálculo Financeiro	53
6.1. Projeto 1 - Aproveitamento do Biogás para Geração de Combustível para Empilhadeiras	53
6.1.1. Descrição do Projeto 1	53
6.1.2. Potencialidade do Projeto 1	54
6.1.3. Materiais, Equipamentos e Montagem do Projeto 1	56
6.1.4. Despesas não Orçadas para Implantação do Projeto 1	57
6.1.5. Valor Estimado para o Projeto 1 – Purificação do Biogás em Condições Automotivas	57
6.1.6. Valor Estimado para o de Transporte do Biogás da Estação de Tratamento de Efluentes até PitStop – Projeto 1	58
6.1.7. Valor Total para o Projeto 1	58
6.2. Projeto 2 - Aproveitamento do Biogás para Queima em Turbinas de Cogeração de Energia Elétrica e Térmica	59
6.2.1. - Descrição do Projeto 2	59
6.2.2. – Potencialidade do Projeto 2	59
6.2.3. – Materiais, Equipamentos e Montagem do Projeto 2	60
6.2.4. – Despesas não Orçadas para Implantação do Projeto 2	61

6.2.5. – Valor Estimado para o Projeto 2	61
6.2.6. – Valor Estimado para o Transporte do Biogás da Estação de Tratamento de Efluentes até Turbinas – Projeto 2	61
6.2.7. – Valor Total para o Projeto 2	62
6.3. – Projeto 3 - Aproveitamento do Biogás para Queima como Combustível para Caldeiras Geradoras de Vapor	62
6.3.1. - Descrição do Projeto 3	62
6.3.2. – Potencialidade do Projeto 3	62
6.3.3. – Materiais, Equipamentos e Montagem do Projeto 3	63
6.3.4. – Despesas não Orçadas para Implantação do Projeto 3	62
6.3.5. – Valor Estimado para o Projeto 3	63
6.3.6. – Valor Estimado para o Transporte do Biogás da Estação de Tratamento de Efluentes até Caldeiras – Projeto 3	63
6.3.7. – Valor Total para o Projeto 3	63
6.4. – Projeto 4 – Aproveitamento do Biogás para Queima direta em Motogerador	64
6.4.1. – Descrição do Projeto 4	64
6.4.2. – Potencialidade do Projeto 4	65
6.4.3. – Materiais, Equipamentos e Montagem do Projeto 4	65
6.4.4. – Despesas não Orçadas para Implantação do Projeto 4	65
6.4.5. – Valor Estimado para o Projeto 4	66
6.4.6. – Valor Estimado para Transporte do Biogás até Motogerador	66
6.4.7. – Valor Total para o Projeto 4	66
7. Cálculos de Retorno Financeiro	67
7.1. - Custos para Cálculos de substituição do Gás Natural pelo Biogás	67
7.2. – Custos para Cálculo de Fornecimento de Energia Elétrica	68
7.3. – Comparação entre os Projetos 1, 2 e 3 e Análise de Viabilidade Econômica	68
7.4. - Retorno Financeiro	69
7.4.1. – Cálculos Projeto 01	70
7.4.2. – Cálculos Projeto 02	71
7.4.3. – Cálculos Projeto 03	73
7.4.4. – Cálculos Projeto 04	74
7.5. – Resumo dos Cálculos dos Projetos	75
8. Ganhos Ambientais	76
9. Conclusão	78
Referências Bibliográficas	79

1. INTRODUÇÃO

A sociedade tem um grande desafio de promover o desenvolvimento humano aliado à preservação do ambiente, este desafio tem crescido gradativamente à medida que foram criados projetos de construção para evolução de nossa espécie. Todo processo da evolução do ser humano causou grandes modificações no ambiente natural e antes preservado em que vivíamos, essa fase de acelerado crescimento e busca pelo sucesso no sistema capitalista, contribuiu para alterações do meio, que são percebidas com as mudanças climáticas, aquecimento global, efeito estufa, inversões térmicas, entre outras alterações ambientais que estão em evidência.

O século XIX significou o século da hegemonia mundial inglesa. Durante a maior parte desse período o trono inglês foi ocupado pela rainha Vitória (1837-1901), recebendo a denominação de era vitoriana. Foi a era do progresso econômico-tecnológico e, também, da expansão colonialista, além das contínuas lutas e conquistas dos trabalhadores.

Na busca de novas áreas para colonizar, a Revolução Industrial produziu uma acirrada disputa entre as potências, originando inúmeros conflitos e um crescente armamentismo que culminariam na Primeira Guerra Mundial, iniciada em 1914.

A era do progresso industrial possibilitou a transformação de todos os setores da vida humana. O crescimento populacional e o acelerado êxodo rural determinaram o aparecimento das grandes cidades industriais: Londres e Paris, que em 1880 já contavam, respectivamente, com 4 e 3 milhões de habitantes. Esses grandes aglomerados humanos originaram os mais variados problemas de urbanização: abastecimento de água, canalização de esgotos, criação e fornecimento de mercadorias, modernização de estradas, fornecimento de iluminação, fundação de escolas, construção de habitações, etc.

Esta dissertação está baseada no reaproveitamento do biogás gerado em uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria cervejeira. A proposta será analisar as características do biogás, composto principalmente por uma combinação de metano (CH_4), dióxido de carbono e (CO_2), entre outros gases em menores quantidades, que integram um combustível muito rico em energia, e desenvolver uma forma que possa aproveitá-lo da melhor forma possível, comparando 04 processos diferentes: a) utilização em alternativas aos combustíveis de empilhadeiras que

atualmente utilizam gás liquefeito de petróleo (GLP); b) promover a queima direta em uma caldeira movida a gás natural; c) promover a queima em uma turbina movida a gás natural para co-geração de energia elétrica e térmica; ou d) promover a queima direta em motogeradores de energia elétrica.

Processos de decomposição de matéria orgânica, como no caso do sistema de tratamento de efluentes da indústria cervejeira, laticínios, ou em um aterro sanitário com ou sem controle, ou resíduos orgânicos de qualquer natureza, há potencial produção de biogás. A ausência de políticas compromete o reuso desta enorme fonte de energia. O biogás quando emitido pela decomposição da matéria orgânica, provoca grande poluição ao ar ambiente e efeito estufa, chegando a 21 vezes maior seu teor de poluição quando comparado ao CO₂ (Ministério Meio Ambiente 2008) e em determinadas concentrações seu potencial explosivo coloca em risco a vida circunvizinha.

Com o tratamento do gás para a geração de energia elétrica através de motogeradores, turbinas, queima direta em caldeiras a gás ou reuso com combustível de empilhadeiras, pode-se minimizar a emissão de gás carbônico para a atmosfera, enquanto se produz mais energia para atender a crescente demanda. É extremamente importante ressaltar que a emissão de carbono regulamentada pelo Protocolo de Quioto, no quesito dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), pode render cotas de emissões aos países que promoverem a reutilização destes gases, as quais poderão ser trocadas por capital estrangeiro, conhecida como o mercado de Crédito de Carbono, que devidamente aplicados poderiam assegurar melhoria na situação econômica nacional.

O objetivo deste estudo é analisar o processo de geração e captação do biogás em uma indústria cervejeira com a intenção de reuso para geração de energia, visto que, atualmente a maioria das indústrias do ramo cervejeira, queima esse gás para atender demandas de legislação ambiental. Essa dissertação visa também o desenvolvimento de processos com maior eficiência para tornar a indústria com maior grau de auto-suficiência em geração energia. E realiza uma análise técnica, econômica e ambiental dos sistemas propostos para reuso do biogás.

1.1. - O Processo de Fabricação de Cerveja

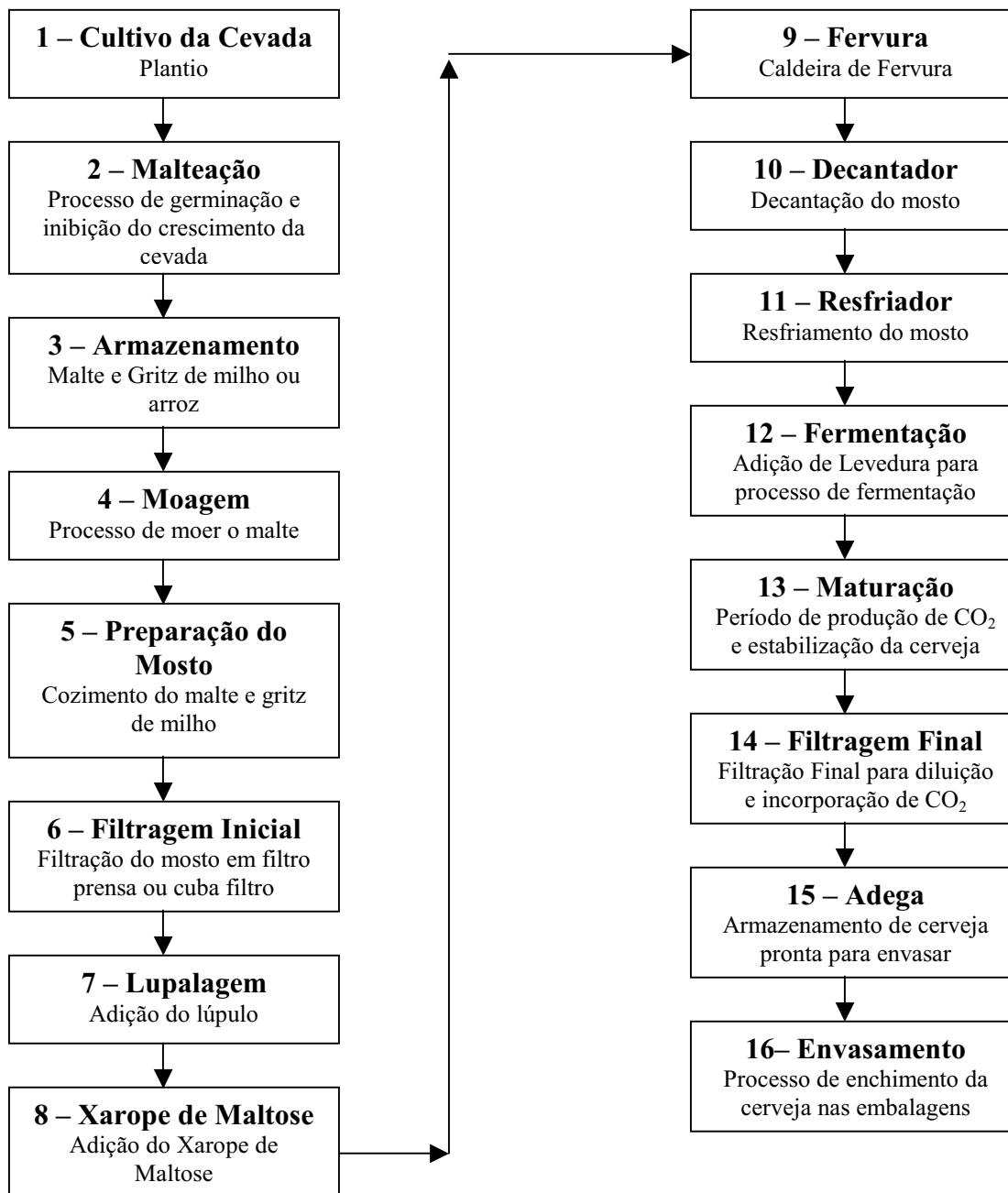
A cerveja é uma bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto de malte de cevada em água potável por ação da levedura cervejeira, com adição de lúpulo ou seu extrato, podendo parte do malte ser substituído por cereais malteados ou não, ou por carboidratos de origem vegetal.

1.2. – História da Cerveja

A descoberta da cerveja ocorreu acidentalmente pelos Simérios no ano de 4.000 a.c., em que a união de pão e água resultou em uma fermentação que degustada no dia seguinte resultou na primeira bebida fermentada. Na seqüência em 3.000 a.c. os Assírios e Babilônios produziram a primeira bebida e em 2.000 a.c. pelos Egípcios. Em 500 a.c. foi nomeada de Cerevisia originada de uma bebida de Ceres, Deusa romana da fertilidade agrícola, atualmente denominada cerveja. Em 300 d.c. a cerveja chegou à Europa Ocidental (Alemanha, França, Inglaterra e Bélgica), já em 1.040 d.c. houve um grande contribuição do monges Beneditinos com a Adição de Lúpulo (Planta que agrega amargor a Cerveja), contribuíram também com a produção em série e a comercialização. Em 1.516 d.c. o Duque Guilherme IV da Bavaria-ALE, criou a Lei da Pureza que regulava as matérias-primas utilizadas na fabricação de cerveja e também proibia a adição de ervas prejudiciais à saúde. Em 1.836 as cervejas chegam ao Brasil com a marca “Barbante”. Outras grandes contribuições para fabricação de cerveja foram desenvolvidas por: Louis Pasteur que desenvolveu um processo de estabilização da proliferação microbológica denominado de Pasteurização; Emil Christian Hansen que desenvolveu a cultura pura da Levedura (Bactéria responsável pela fermentação); e Carl Von Linde que desenvolveu o sistema de baixa fermentação.

1.3 – Fases de Produção da Cerveja

Apresenta-se abaixo um fluxograma que descreve as principais fases do processo de produção de cerveja.

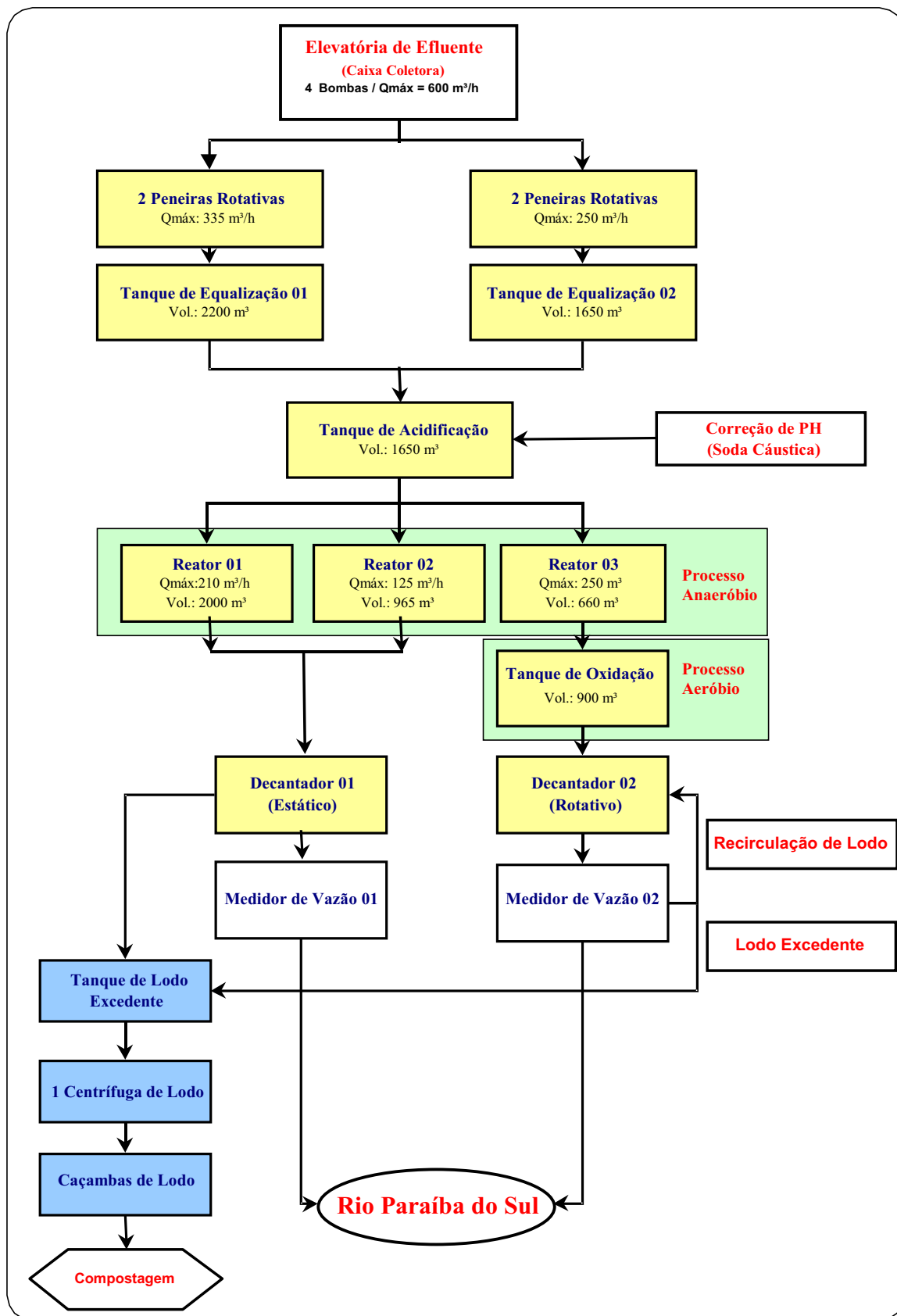


1.4. - A Composição do Afluente do Processo de Fabricação de Cerveja

A Qualidade e a Quantidade do efluente cervejeiro pode flutuar significativamente, tal fator depende de vários processos diferentes que ocorrem dentro da cervejaria (manuseio de matéria-prima, preparação mosto, fermentação, filtração, assepsia, envasamento, etc).

O afluente é basicamente de formação orgânica que são de forma geral facilmente biodegradáveis, e consistem em açúcares, amido solúvel, etanol, ácidos voláteis, etc. O pH desta solução de descarte tem características ácidas com resultado de pH em torno de 4,5, podendo chegar a 11 nas situações de descarte de solução CIP (*Cleaning in process*). As estações de tratamento de efluentes utilizam diversos produtos para correção deste descarte como: soda cáustica, ácido fosfórico, ácido nítrico, etc. Com intuito de neutralizar o pH e deixá-lo em condições ideais para iniciar o tratamento biológico, garantindo assim um boa eficiência em remoção de carga orgânica e redução de odores na planta.

1.5 - O FLUXOGRAMA DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA CERVEJARIA



2. - REATORES ANAERÓBIOS

Os reatores anaeróbios são elaborados com tecnologia amplamente utilizada, devido à simplicidade de funcionamento para efluentes com elevada carga orgânica. A investigação científica sobre sistemas anaeróbios de tratamentos de esgotos, notadamente os reatores de manta de lodo (UASB), permitiram ao sistema maior destaque, no Brasil e no mundo, devido principalmente às condições de funcionamento (CUNHA e NETO, 2000). Este tipo de reator que no início dos anos oitenta era de uso incipiente por possuir poucos adeptos, passou a ocupar posição de destaque pela elevada aceitação agora verificada. Entretanto, há pesquisadores cujos trabalhos trazem críticas severas aos processos anaeróbios de geração de gás. É oportuno lembrar que parte das críticas advém de preconceitos ou conhecimento superficiais do processo de geração anaeróbica de gás. (GRADY e LIM, 1980).

2.1 - Despejos Passíveis de Serem Tratados Por Via Anaeróbia

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 digestores anaeróbios têm sido largamente aplicados para o tratamento de resíduos sólidos, incluindo culturas agrícolas, dejetos de animais, lodos de estação de tratamento de esgotos e lixo urbano, estima-se que milhões de digestores anaeróbios encontram-se em operação hoje no mundo. A digestão anaeróbia também tem sido muito aplicada para o tratamento de efluentes de indústrias agrícolas, alimentícias e de bebidas, entre elas citam-se: abatedouros, frigoríficos, produção de álcool, processamento de batatas, cervejarias, 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 de vegetais (GTZ – TBW, 1997).

Em relação ao tratamento de esgotos domésticos tem-se verificado uma crescente utilização da tecnologia anaeróbia (VON SPERLING, 1995), notadamente através dos reatores tipo UASB. Entretanto, esta tecnologia que depende da proliferação de bactérias anaeróbicas é cessível a variações da temperatura da matéria prima e não se consegue produtividade para

valores abaixo de 20°C. Os processos em que se usam partes do gás gerado para aquecer a matéria prima não pode ser aplicado para o esgoto doméstico por ser este muito diluído.

O tratamento anaeróbio de esgotos domésticos torna-se bem mais atrativo para os países de clima tropicais e subtropicais, que são principalmente os países em desenvolvimento. Atualmente, diversas estações de tratamento anaeróbio já se encontram em operação no Brasil, no México e na Colômbia, enquanto grandes estações encontram-se em construção na Indonésia, Venezuela, Equador e Índia (GTZ–TBW, 1997).

2.2 – Características dos Processos Anaeróbios.

As diversas características favoráveis dos sistemas anaeróbios, passíveis de serem operados com elevados tempos de retenção de sólidos e baixíssimos tempos de detenção hidráulica, conferem aos mesmos um grande potencial para a aplicabilidade em tratamentos de águas residuárias de baixa concentração. Estes equipamentos utilizam tecnologias simples, de baixo custo, de fácil operação e manutenção sendo que suas principais vantagens e desvantagens estão descritas na tabela 01.

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

Nos sistemas anaeróbios, verifica-se que a maior parte do material orgânico biodegradável presente é convertida em biogás (cerca de 70 a 90 %). Apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), vindo a se constituir o lodo excedente do sistema. O material não convertido em biogás ou em biomassa deixa o reator como material não degradado (10 a 30%).

Tabela 01 – Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.

Vantagens	Desvantagens
- Baixa produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios;	- As bactérias são susceptíveis à inibição por um grande número de compostos, podendo comprometer a eficiência ou suspender as atividades da planta;
- Redução de consumo de energia, usualmente associada a uma elevatória de chegada;	- A partida do processo pode ser lenta na ausência de lodo de semeadura adaptado;
- Necessita de uma área muito menor que utilizada para implantação dos sistemas aeróbios;	- Alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária;
- Baixos custos de implantação, quando comparados aos sistemas aeróbios;	- A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e precisam ser mais estudadas;
- Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico e com potencial de reaproveitamento;	- Dificuldade de controlar a geração de maus odores;
- Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por aproximadamente 8 meses;	- Possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável;
- Tolerância a elevadas cargas orgânicas;	- Remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos insatisfatórias.
- Aplicabilidade em pequena e grande escala;	- Processo dependente da temperatura do lodo.
- Baixo consumo de nutrientes.	

Fonte: Adaptado de (CHERNICARO e CAMPOS,1995); (VON SPERLING,1995), (LETTINGA *et al.*,1996).

Conforme mostrado na fig. 01, pode-se verificar que os efluentes tratados dos reatores anaeróbios apresentam maior quantidade de materiais não degradados do que nos reatores aeróbios, entretanto, os reatores anaeróbios são indicados como sistemas integrados de proteção

ambiental por serem eficazes no tratamento de esgotos e disponibilizarem para reuso seus subprodutos (LETTINGA, 1995).

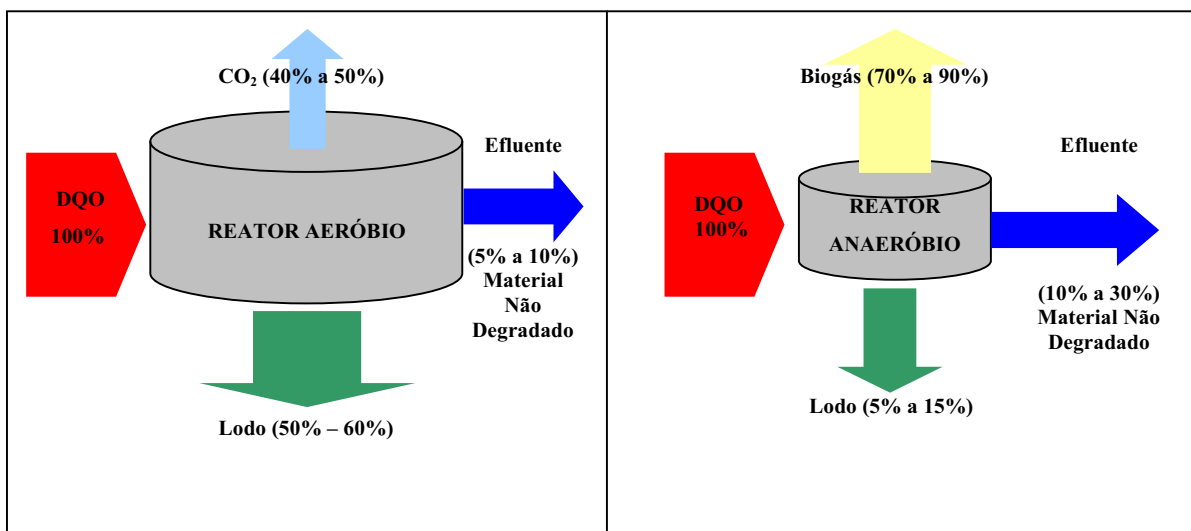


Figura 01 – Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios

Fonte: (CHERNICHARO, 1997).

O fato de o efluente tratado pelos reatores anaeróbios possuir mais material não degradado que os efluentes dos reatores aeróbios pode ser compensado pelo baixo custo de implantação e manutenção e pela geração de gás de alto poder calorífico. A utilização destes sistemas é indicada principalmente para os países em desenvolvimento, que apresentam graves problemas ambientais, falta de recursos, falta de energia e, baixa produção de alimentos (BARROS *et al*, 1995). Neste sentido a digestão anaeróbia apresenta-se como alternativa integrada de tratamento de esgotos e de recuperação de subprodutos, conforme ilustrado na fig. 02.

2.3 – Fundamentos da Digestão Anaeróbia

No processo de conversão de matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio são utilizados aceptores de elétrons inorgânicos como o NO_3^- (redução de nitrato), SO_4^{2-} (redução de sulfato), ou CO_2 (formação de metano). A formação de metano não ocorre em ambientes onde oxigênio, nitrato ou sulfato encontram-se prontamente disponíveis como aceptores de elétrons. A produção de metano ocorre em diferentes ambientes tais como pântanos, solo, sedimentos de rios,

lagos e mares, assim como nos órgãos digestivos de animais ruminantes. Estima-se que a digestão anaeróbia com formação de metano seja responsável pela completa mineralização de 5 a 10 % de toda a matéria orgânica disponível na terra (CHERNICHARO, 1997).

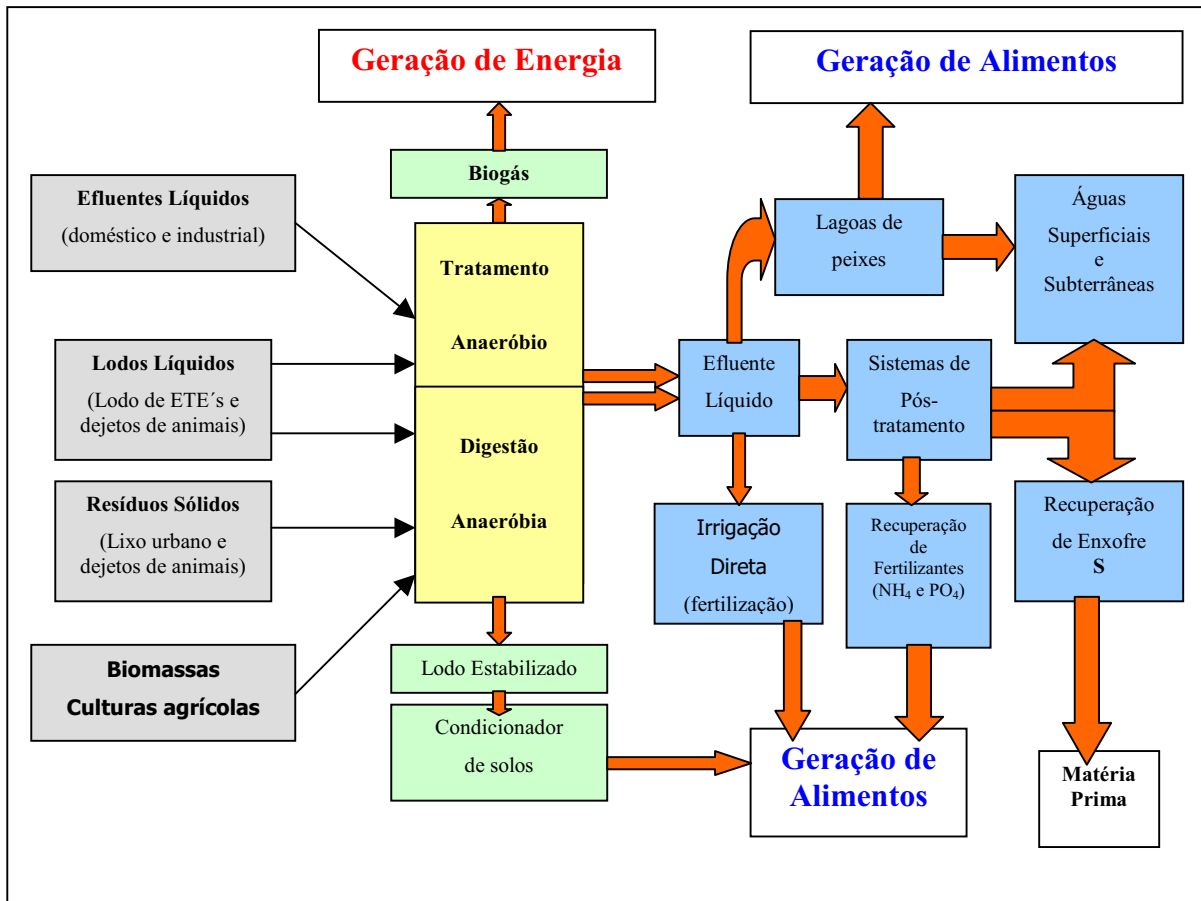


Figura 02 – Digestão anaeróbia como tecnologia de integrada de tratamento de esgotos e de recuperação de subprodutos.

Fonte: (LETTINGA, 1995).

A digestão anaeróbia representa um sistema ecológico delicadamente balanceado, onde cada microrganismo tem uma função essencial. As bactérias metanogênicas desempenham duas funções primordiais: elas produzem um gás insolúvel (metano), possibilitando a remoção de carbono orgânico do ambiente anaeróbio, e utilizando o hidrogênio, criando condições para que as bactérias acidogênicas fermentem compostos orgânicos com a produção de ácido acético, que é convertido em metano (SOUBES, 1994).

A digestão anaeróbia de compostos orgânicos complexos é normalmente considerada um processo de dois estágios. No primeiro estágio, um grupo de bactérias facultativas e anaeróbias,

denominadas formadoras de ácidos ou fermentativas, converte os orgânicos complexos em outros compostos. Compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteína e lipídios são hidrolisados, fermentados e biologicamente convertidos em materiais orgânicos mais simples, principalmente ácidos voláteis.

No segundo estágio ocorre a conversão dos ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasosos, o metano e o gás carbônico. Esta conversão é efetuada em especial por um grupo especial de bactérias, denominadas formadoras de metano, as quais são estritamente anaeróbias. As bactérias metanogênicas dependem do substrato fornecido pelas acidogênicas, configurando, portanto uma interação comensal. Uma vez que as bactérias metanogênicas são responsáveis pela maior parte da degradação do resíduo, a sua baixa taxa de crescimento e de utilização dos ácidos orgânicos normalmente representa o fator limitante no processo de digestão como um todo.

2.3.1 - Microbiologia da Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas (FORESTI, 1994).

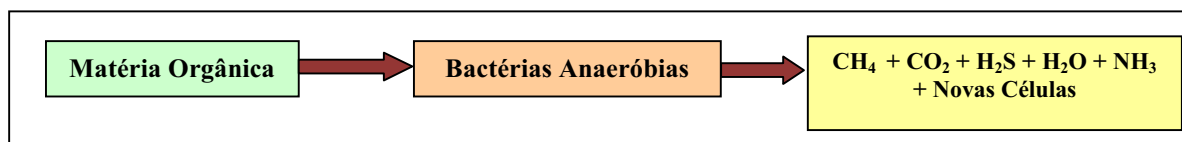


Figura 03 – Esquema simplificado da digestão anaeróbia com os compostos resultantes.
Fonte: (CHERNICHARO,1997).

Os microrganismos que participam do processo de decomposição anaeróbia podem ser divididos em três importantes grupos de bactérias, com comportamentos fisiológicos distintos:

- Bactérias fermentativas - primeiro grupo formado por bactérias que 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 glicose;

- Bactérias acetogênicas - grupo formado por bactérias produtoras de hidrogênio, o qual converte os produtos gerados pelo primeiro grupo (aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e alcoóis) em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;

- Bactérias Metanogênicas – Os produtos finais do segundo grupo são os substratos essenciais para o terceiro grupo, que por sua vez constitui dois diferentes grupos de bactérias metanogênicas. 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, conforme fig 04.

O processo de digestão anaeróbia é simplificada e considerado de duas fases, mas este pode ser dividido em quatro principais fases. A Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese.

- Hidrólise:

Uma vez que as bactérias não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada, a primeira fase no processo de degradação anaeróbia consiste na hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros), em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores), os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Esta conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos é conseguida através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas.

Na anaerobiose, a hidrólise dos polímeros usualmente ocorre de forma lenta, sendo vários os fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado (LETTINGA *et al.*, 1996):

- Temperatura operacional do reator;
- Tempo de residência do substrato no reator;
- Composição do substrato (ex: teores de lignina, carboidrato, proteína e gordura);
- Tamanho das partículas;
- pH do meio;
- Concentração de $\text{NH}_4^+\text{-N}$;
- Concentração de produtos da hidrólise (ex: ácidos graxos voláteis).

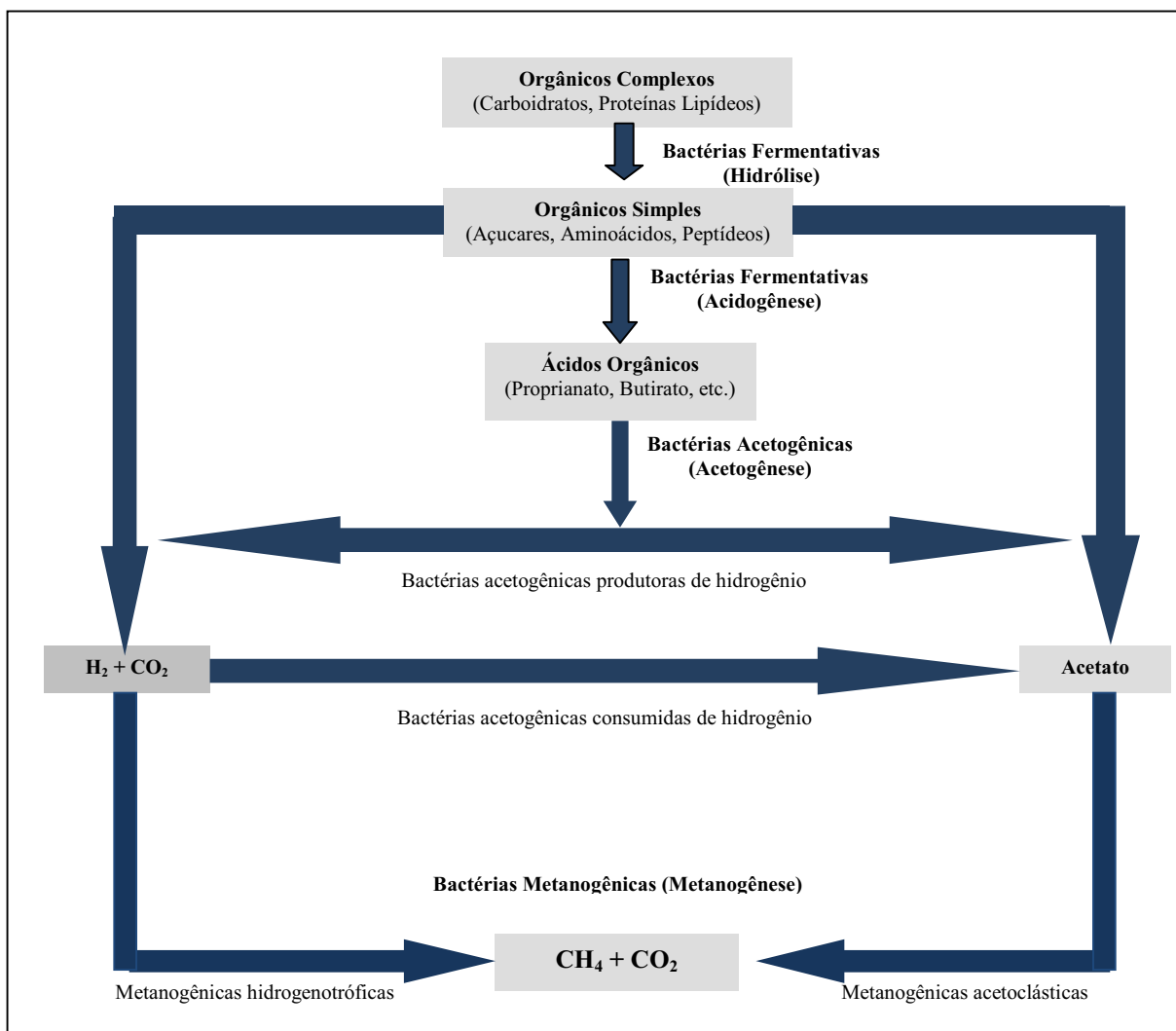


Figura 04 – Seqüências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.
Fonte: (CHERNICHARO, 1997).

- 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 voláteis, alcoóis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, 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*. A primeira constitui uma espécie anaeróbia que forma esporos, podendo, dessa forma, sobreviver em ambientes totalmente adversos. As *Bacteroids* encontram-se comumente presentes nos tratamentos 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 e LETTINGA, 1994).

- Acetogênese:

As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. Dessa forma, as bactérias acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário, que produz substrato para as metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono, e o acetato.

Durante a formação do ácido acético e propiônico, uma grande quantidade de hidrogênio é formada, fazendo com que o valor do pH no meio aquoso decresça (BARREDO, 1988). Há porém duas maneiras pelas quais o hidrogênio é consumido no meio:

1 – através das bactérias metanogênicas, que utilizam hidrogênio e dióxido de carbono para a produção de metano;

2 – Através da formação de ácidos orgânicos, tais como propiônico e butírico, ácidos estes formados através da reação do hidrogênio com o dióxido de carbono e ácido acético.

De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas metanogênicas. Porém, pelo menos 50% da DQO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) biodegradável é convertida em propionato e butirato, os quais são posteriormente decompostos em acetato e hidrogênio pela ação das bactérias acetogênicas.

- **Metanogênese:**

A etapa final no processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono é efetuada pelas bactérias metanogênicas (ORENLAND & POLCIN, 1982). 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 do ácido acético ou metanol, e o segundo que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono, como a seguir:

- Bactérias utilizadoras de acetato (acetoclásticas);
- Bactérias utilizadoras de hidrogênio (hidrogenotróficas);

Metanogênicas acetoclásticas

Embora apenas poucas espécies de metanogênicas sejam capazes de formar metano a partir do acetato, estas 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* (*Methanothrix*). O gênero *Methanosaeta* caracteriza-se por utilizar exclusivamente o acetato, tendo, por este, mais afinidade que as metanosarcinas. Desenvolvem-se na forma de filamentos e têm grande importância na formação da trama bacteriana contida nos grânulos. Os organismos pertencentes ao gênero *Methanosarcina* se desenvolvem na forma de cocos, que se agrupam formando “pacotes” (CHERNICHARO, 1997). São considerados os mais versáteis entre os metanogênicos, já que possuem espécies capazes de utilizar também o hidrogênio e as metilaminas (SOUBES, 1994).

Metanogênicas hidrogenotróficas

Ao contrário das acetoclásticas, praticamente todas as espécies conhecidas de bactérias 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 *Mathanobrevibacter*.

Tanto as bactérias 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 isto, é propiciado a abaixamento da pressão parcial de hidrogênio no meio, tornando possível as reações de produção das acidogênicas e acetogênicas.

Além das quatro fases anteriormente descritas, o processo de digestão anaeróbia pode incluir ainda, uma quinta fase, dependendo da composição química do despejo a ser tratado. Despejos que contenham compostos de enxofre são submetidos à fase de sulfetogênese, que reduz o sulfato e formação de sulfetos (VISSER, 1995).

- Sulfetogênese:

A produção de sulfetos é um processo no qual o sulfato e outros compostos a base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Durante este processo, sulfato, sulfeto, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias redutoras de sulfato (ou bactérias sulforedutoras) (CHERNICHARO, 1997).

As bactérias sulforedutoras são consideradas um grupo muito versátil de microrganismos, capazes de utilizar uma ampla gama de substratos, incluindo toda a cadeia de ácidos graxos voláteis, diversos ácidos aromáticos, hidrogênio, metanol, etanol, glicerol, açúcares, aminoácidos e vários compostos fenólicos. As bactérias sulforedutoras dividem-se em dois grandes grupos (VISSER, 1995; CHERNICHARO, 1997):

- Bactérias sulforedutoras que oxidam seus substratos de forma incompleta até o acetato. A esse grupo pertencem os gêneros *Desulfobulbus*, *Desulfomonas* e a maioria das espécies dos gêneros *Desulfotomaculum* e *Desulfovibrio*.

- Bactérias sulforedutoras que oxidam seus substratos completamente até o gás carbônico. A esse grupo pertencem os gêneros *Desulfobacter*, *Desulfococcus*, *Desulfosarcina*, *Desulfobacterium* e *Desulfonema*.

Na ausência de sulfato, o processo de digestão anaeróbia ocorre de acordo com a fig. 04 (ORENLAND & POLCIN, 1982). Com a presença de sulfato numa água residuária, muitos compostos intermediários, formados através das rotas identificadas na fig. 04, passam a ser utilizados pelas bactérias sulforedutoras, provocando uma alteração nas rotas metabólicas no digestor anaeróbio conforme demonstrado na Fig. 05. Dessa forma, as bactérias sulforedutoras passam a competir com as bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas pelos substratos disponíveis. A importância dessa competição bacteriana é maior quando ocorre o aumento na concentração relativa de SO_4^{2-} em relação à concentração de DQO.

2.3.2 - Bioquímica da Digestão Anaeróbia

No processo de digestão anaeróbia de compostos orgânicos existem diversos tipos de bactérias metanogênicas e acidogênicas, sendo que o estabelecimento de um equilíbrio ecológico entre os tipos e espécies de microrganismos anaeróbios é de importância fundamental para a eficiência do sistema de tratamento. Para a avaliação desse equilíbrio ecológico utiliza-se com frequência o parâmetro Ácidos Graxos Voláteis (AGV) (CHERNICHARO, 1997).

Os ácidos graxos voláteis são formados, como produtos intermediários, durante a degradação de carboidratos, proteínas e lipídeos. Os componentes mais importantes resultantes da decomposição bioquímica da matéria orgânica são os ácidos voláteis de cadeia curta, como o fórmico, acético, propiônico, butírico e, em menor quantidade o valérico e o isovalérico. Estes ácidos graxos de baixo peso molecular são denominados ácidos voláteis porque podem ser destilados à pressão atmosférica. Os ácidos voláteis representam compostos intermediários, a partir dos quais a maior parte do metano é produzida, através da conversão pelas bactérias metanogênicas.

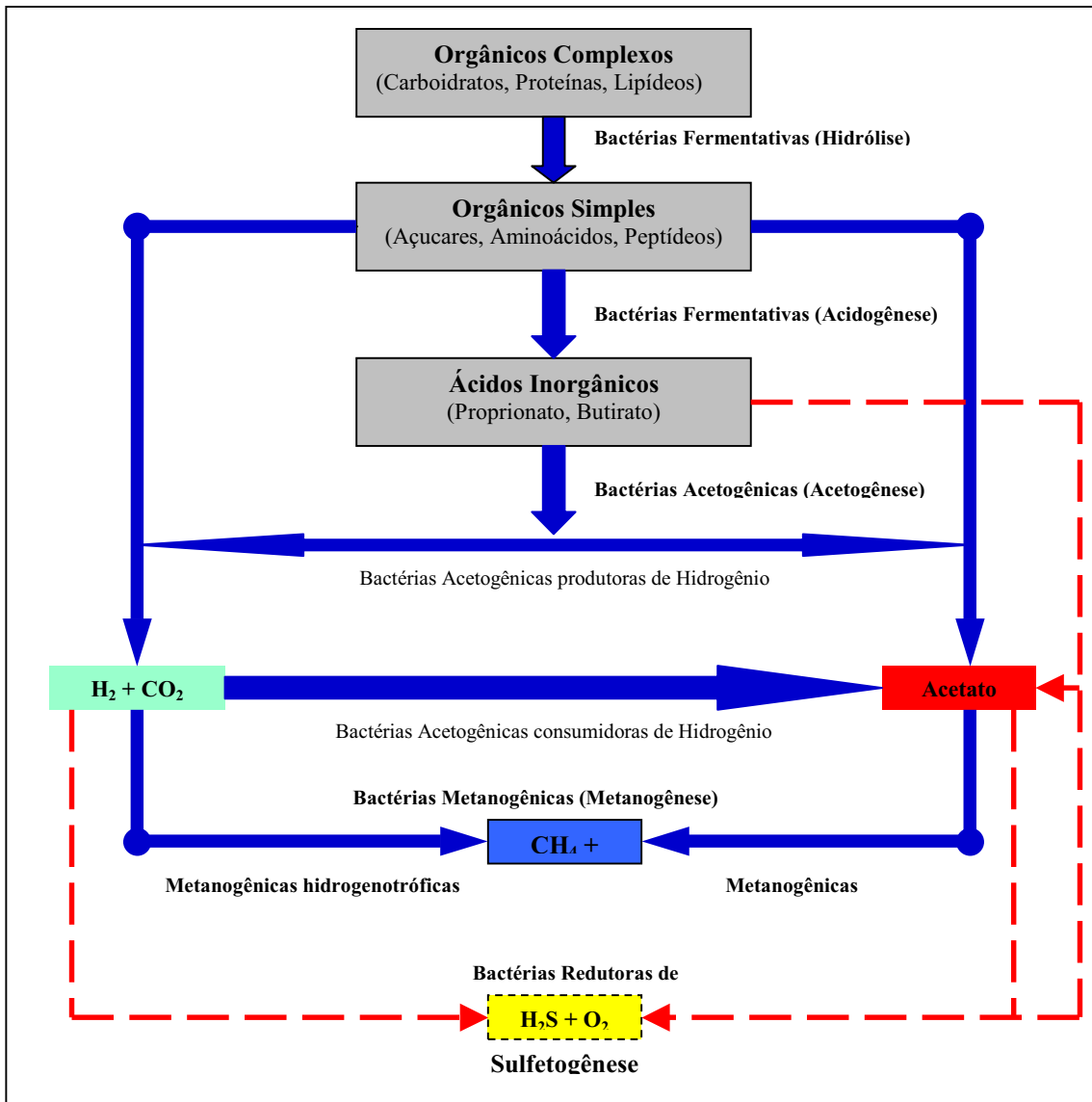


Figura 05 – Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia, com redução de sulfato.

Fonte: (CHERNICHARO, 1997).

Quando uma população de bactérias metanogênicas se encontra presente em quantidade suficiente, e as condições ambientais no interior do sistema de tratamento são favoráveis, estas utilizam os ácidos intermediários tão rapidamente quanto estes são formados. Como resultado, os ácidos não se acumulam além da capacidade neutralizadora da alcalinidade naturalmente presente no meio, o pH permanece numa faixa favorável às bactérias metanogênicas e o sistema anaeróbio é considerado em equilíbrio. Entretanto, se as bactérias metanogênicas não estiverem presentes em número suficiente, ou se estiverem expostas a condições ambientais desfavoráveis, estas não

serão capazes de utilizar os ácidos voláteis na mesma taxa em que são produzidos pelas bactérias acidogênicas, resultando numa acumulação de ácidos no sistema. Nestas condições, a alcalinidade é consumida rapidamente e os ácidos livres, não neutralizados, provocam a queda do pH. Esta reação é normalmente referenciada como Reator Azedo, e ainda que uma identificação dos ácidos individuais presentes no reator com desequilíbrio das populações bacterianas poderá indicar qual tipo de bactéria metanogênica não está cumprindo a sua parte no tratamento (LETTINGA, 1995).

2.3.3 - Ácidos Voláteis Intermediários

Os mais importantes ácidos voláteis intermediários, precursores da formação do metano, são o acético e o propiônico. Alguns dos vários degraus metabólicos envolvidos na degradação de um substrato complexo, a exemplo do lodo excedente proveniente de uma estação de esgotos domésticos, são mostrados na fig. 06. As porcentagens mostradas são baseadas na conversão da DQO, sendo válidas apenas para a formação de metano a partir de substratos complexos, como o lodo de ETE, ou outros de composição similar (CHERNICHARO, 1997).

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, sendo que cerca de 30% do composto orgânico é convertido neste ácido antes que possa ser finalmente convertido em metano. O ácido acético é o ácido intermediário mais abundante, sendo formado praticamente a partir de todos os compostos orgânicos. No caso da degradação de substratos complexos, como o lodo de ETE, o ácido acético é precursor de cerca de 72% do metano formado e, juntamente com o ácido propiônico cerca de 85% da produção total de metano. Uma grande proporção dos 15% restantes é resultante da degradação de outros ácidos, como o fórmico e o butírico.

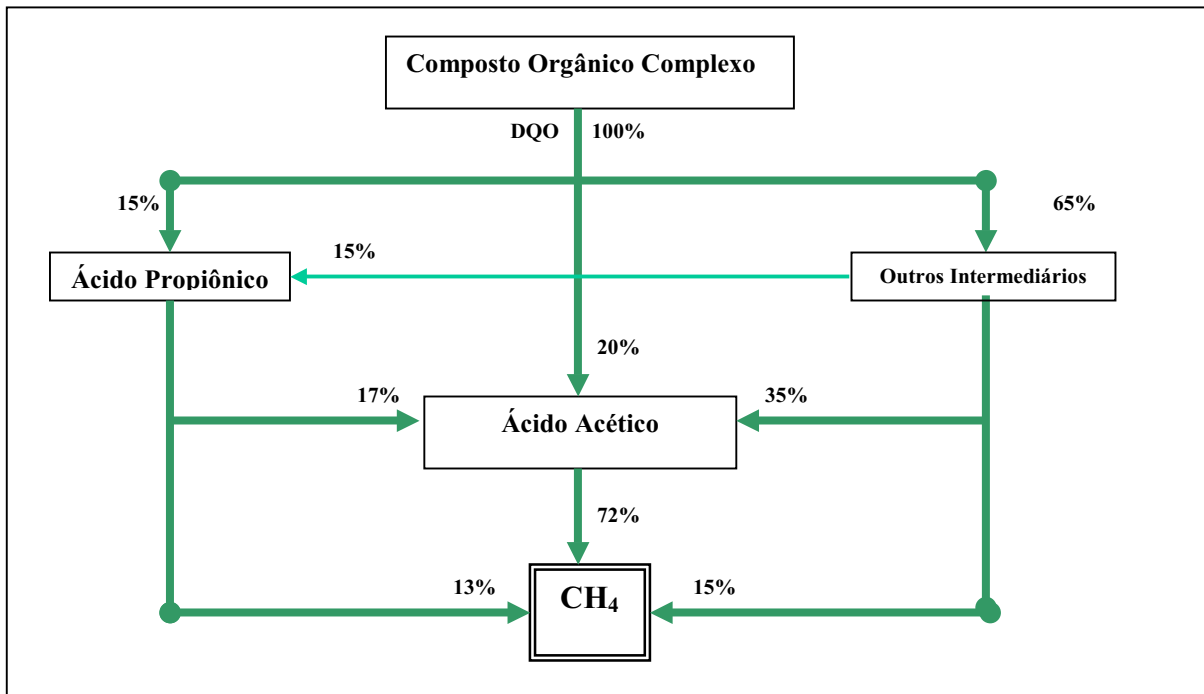


Figura 06 – Rotas de Formação de Metano a partir da fermentação de substratos complexos
 Fontes: (CHERNICHARO, 1997, MCCARTY & SPEECE, 1964).

2.3.4 - Aspectos Termodinâmicos

Algumas das reações de conversão dos produtos das bactérias fermentativas em acetato e dióxido de carbono são ilustradas na tab. 02. A última coluna do quadro fornece a variação de energia livre padrão (pH igual a 7 e pressão de 1 atm), considerando a temperatura de 25°C e o líquido como sendo água pura. Todos os compostos presentes na solução apresentam uma atividade de 1 mol/kg (CHERNICHARO, 1997).

De acordo com os exemplos apresentados na tabela 02, é possível perceber claramente que o propionato, o butirato e o etanol (reações 1, 2 e 3) não são degradados nas condições padrão assumidas, uma vez que os aspectos termodinâmicos são desfavoráveis ($\Delta G_0 > 0$). Todavia, as reações podem se deslocar para a direita (lado dos produtos), caso a concentração de hidrogênio seja baixa. Na prática, isso é conseguido pela remoção contínua de H_2 do meio, através de reações aceptoras de elétrons, como por exemplo, as reações 5, 6 e 7 da tabela 02.

Tabela 02 – Algumas reações de oxiredução importantes na digestão anaeróbia.

Nº	Reações de Oxidação (doadoras de elétrons)		ΔG_0 (kJ/mol)
1	Propionato \Rightarrow Acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 3\text{H}_2$	+ 76,1
2	Butirato \Rightarrow Acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+ 48,1
3	Etanol \Rightarrow Acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+ 9,6
4	Lactato \Rightarrow Acetato	$\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	-4,2
Nº	Reações de Redução (aceptoras de elétrons)		ΔG_0 (kJ/mol)
5	Bicarbonato \Rightarrow Acetato	$2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 + \text{H}^+ \Rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	- 104,6
6	Bicarbonato \Rightarrow Metano	$\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 + \text{H}^+ \Rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-135,6
7	Sulfato \Rightarrow Sulfeto	$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}_2 + \text{H}^+ \Rightarrow \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-151,9

Fonte: (FORESTI, 1994; LETTINGA *et al*, 1996).

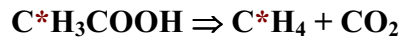
Num digestor metanogênico, operando de forma apropriada a pressão parcial de H_2 não excede a 10^{-4} atm. Nestas condições de baixa pressão parcial de hidrogênio, passa a ocorrer então a degradação de propionato, butirato e etanol, liberando energia livre para o meio. Estas baixas pressões parciais só podem ser mantidas se o hidrogênio formado for rapidamente e efetivamente removido pelas bactérias consumidoras de hidrogênio (LETTINGA *et al*, 1996).

2.3.5 - Formação de Metano

Embora as rotas individuais envolvidas na formação do metano ainda não estejam completamente estabelecidas, houve muito progresso nas últimas décadas em direção a esse entendimento. Algumas espécies de bactérias metanogênicas são capazes de utilizar somente o hidrogênio e o gás carbônico para seu crescimento e formação de metano, enquanto outras são capazes de utilizar o ácido fórmico, o qual é antes convertido em hidrogênio e gás carbônico. Pelo menos duas espécies de *Methanosarcina* são capazes de formar metano a partir de metanol ou ácido acético (CHERNICARO, 1997).

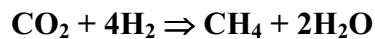
Existem dois mecanismos básicos de formação do metano: 1) pela clivagem do ácido acético; e 2) pela redução do gás carbônico. Estes mecanismos são descritos a seguir:

- 1) Na ausência de hidrogênio, a clivagem do ácido acético conduz à formação de metano e gás carbônico. O grupo metil do ácido acético é reduzido a metano, enquanto o grupo carboxílico é oxidado a gás carbônico:



Grupo bacteriano envolvido = metanogênicas acetoclásticas;

- 2) Quando o hidrogênio se encontra disponível, a maior parte do metano restante é formada a partir da redução do gás carbônico. O CO_2 atua como um acceptor de átomos de hidrogênio removidos dos compostos orgânicos pelas enzimas. Uma vez que o gás carbônico encontra-se sempre presente em excesso em um reator anaeróbio, sua redução de metano não é o fator limitante do processo. O mecanismo de formação do metano a partir da redução do dióxido de carbono é como a seguir, conforme Novaes (1986):



Grupo bacteriano envolvido = metanogênicas hidrogenotróficas.

A composição global do biogás produzido durante a digestão anaeróbia varia de acordo com as condições ambientais presentes no reator. Essa composição muda rapidamente durante o período inicial de partida do sistema e também quando o processo de digestão é inibido. Para reatores operando de maneira estável, a composição do biogás produzido é razoavelmente uniforme. Entretanto, a proporção de gás carbônico em relação ao metano pode variar substancialmente, dependendo das características do composto orgânico a ser degradado. No processo de digestão de esgotos domésticos as proporções típicas de metano e dióxido de carbono no biogás são: CH_4 : 70 a 80%; CO_2 : 30 a 20%. (CHERNICHARO, 1997).

O metano produzido no processo de digestão anaeróbia é rapidamente separado da fase líquida, devido a sua baixa solubilidade em água, resultando num elevado grau de degradação dos despejos líquidos, uma vez que este gás deixa o reator com a fase gasosa. O dióxido de carbono, ao contrário, é bem mais solúvel em água que o metano, saindo do reator parcialmente como gás dissolvido no efluente líquido (ZENDER *et al*, 1982).

2.4. - Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB).

O reator de manta de lodo foi inicialmente desenvolvido e aplicado largamente na Holanda. Essencialmente, o processo consiste de um fluxo ascendente de esgotos através de um leito de lodo denso e de elevada atividade. O perfil de sólidos no reator varia de muito denso e com partículas granulares de elevada capacidade de sedimentação, próximas ao fundo (leito do lodo), até um lodo mais disperso e leve, próximo ao topo do reator (manta de lodo) (CHERNICHARO, 1997).

A estabilização da matéria orgânica ocorre em todas as zonas de reação (leito e manta de lodo), sendo a mistura do sistema promovida pelo fluxo ascensional do esgoto e das bolhas de gás. O afluente entra pelo fundo e o efluente deixa o reator através de um decantador interno localizado na parte superior do reator. Um dispositivo de separação de gases e sólidos localizados abaixo do decantador garante as condições ótimas para a sedimentação das partículas que se desgarram da manta de lodo, permitindo que estas retornem à câmara de digestão, ao invés de serem arrastados para fora do sistema. Embora parte das partículas mais leves seja perdida juntamente com o efluente, o tempo médio de resistência de sólidos no reator é mantido suficientemente elevado para manter o crescimento de uma massa densa de microrganismos formadores de metano, apesar de reduzido tempo de detenção hidráulica (CAMPOS e DIAS, 1989).

Um dos princípios fundamentais do processo é a sua habilidade em desenvolver uma biomassa de elevada atividade. Esta biomassa pode se apresentar na forma de flocos ou grânulos (1 a 5 mm de tamanho). O cultivo de um lodo anaeróbio de boa qualidade é conseguido através de um processo cuidadoso de partida do sistema, durante o qual a seleção artificial da biomassa é imposta, permitindo que o lodo mais leve, de má qualidade, seja arrastado para fora do sistema, ao mesmo tempo em que o lodo de boa qualidade é retido. O lodo mais pesado normalmente se desenvolve junto ao fundo do reator e apresenta uma concentração de sólidos totais da ordem de 40 a 100 g de sólidos totais para cada litro de amostra (40 a 100gST/L). Normalmente, não se utiliza qualquer dispositivo mecânico de mistura, uma vez que estes parecem ter um efeito adverso na agregação do lodo e conseqüentemente na formação de grânulos.

O segundo princípio fundamental do processo é a presença de um dispositivo de separação de gases e sólidos localizados na parte superiores do reator. O principal objetivo deste

dispositivo é a separação dos gases contidos na mistura líquida, de tal forma que zona propícia à sedimentação seja criada no extremo superior do reator (LETTINGA *et al*, 1984).

O projeto de reatores de manta de lodo é bastante simples e não demanda a implantação de qualquer equipamento sofisticado ou de meios de suporte para a retenção de biomassa. O processo foi desenvolvido inicialmente para o tratamento de esgotos concentrados, onde os resultados, tanto em nível de escala piloto quanto escala plena são muito bons. Entretanto, da mesma forma que em outros processos anaeróbios, os reatores de manta de lodo têm sido aplicados também para o tratamento de esgotos de baixa concentração, com resultados bastante promissores (CHERNICHARO, 1997).

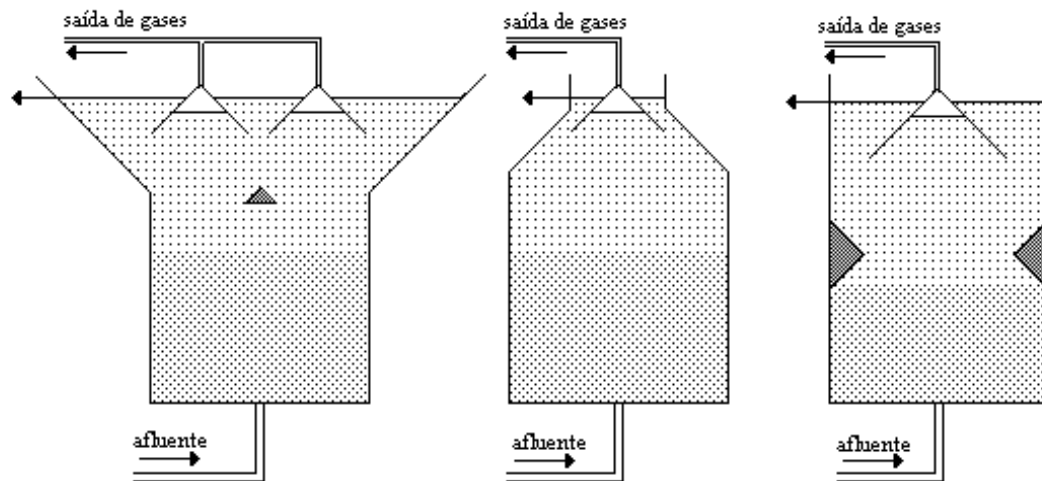


Figura 07 – Esquemas de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo.

Fonte: Universidade Federal da Campina Grande-PB

2.4.1 - Princípios do Processo

O processo de tratamento anaeróbio de efluentes com reatores que possuem manta de lodo, procede-se inicialmente com a inoculação do reator com quantidades suficientes de lodo anaeróbio, iniciando-se em seguida a sua alimentação em baixa taxa no modo ascendente (CAMPOS e DIAS, 1989). Este período inicial é referido como *start up* ou partida do sistema, constituindo-se na fase mais importante da operação do reator. A taxa de alimentação do reator deve ser aumentada progressivamente, de acordo com o sucesso da resposta do sistema, ocorrendo, após alguns meses de operação, o desenvolvimento de um leito de lodo bastante

concentrado (4% a 10%, ou seja, em torno de 40.000 a 100.000 mgST/L) junto ao fundo do reator. O lodo é muito denso e com excelentes características de sedimentação. Pode ocorrer o desenvolvimento de grânulos de lodo (diâmetros de 1 a 5 mm), dependendo da natureza do lodo de sementeira, das características das águas residuárias e das condições operacionais do reator.

Acima do leito de lodo desenvolve-se em uma zona de crescimento bacteriano mais disperso, denominada manta de lodo, em que os sólidos apresentam velocidades de sedimentação mais baixas. A concentração de lodo nessa zona usualmente varia entre 1,5 a 3 %. O sistema é auto-misturado pelo movimento ascendente das bolhas do biogás e do fluxo de esgotos através do reator. Durante a partida do sistema, quando a produção de biogás é usualmente baixa, pode-se tornar necessária alguma forma de mistura adicional, como por exemplo, através da recirculação do gás ou do efluente. A remoção do substrato ocorre através de todo o leito e manta do lodo, embora esta seja mais pronunciada no leito de lodo (CARVALHO,1994).

Com o movimento ascendente das bolhas de gás, ocorre o carregamento de lodo, sendo necessária a instalação de um separador trifásico (gases, sólidos e líquidos) na parte superior do reator, de forma a permitir retenção e o retorno do lodo. No entorno e acima do separador trifásico configura-se uma câmara de sedimentação, onde o lodo mais pesado é removido da massa líquida e retornado ao compartimento de digestão, enquanto as partículas mais leves são perdidas do sistema juntamente com o efluente final.

A instalação do separador de gases sólidos e líquidos é que garante o retorno do lodo e a elevada capacidade de retenção de grandes quantidades de biomassa, de elevada atividade, sem a necessidade de qualquer tipo de meio de suporte. Como resultado, os reatores UASB apresentam elevados tempos de resistência celular (idade do lodo), bastante superiores aos tempos de detenção hidráulica, o que é uma característica dos sistemas anaeróbios de alta taxa de conversão. As idades de lodo verificadas em reatores UASB são usualmente superiores a 30 dias, propiciando que o lodo excedente descartado do sistema já se encontre estabilizado (CHERNICHARO, 1997).

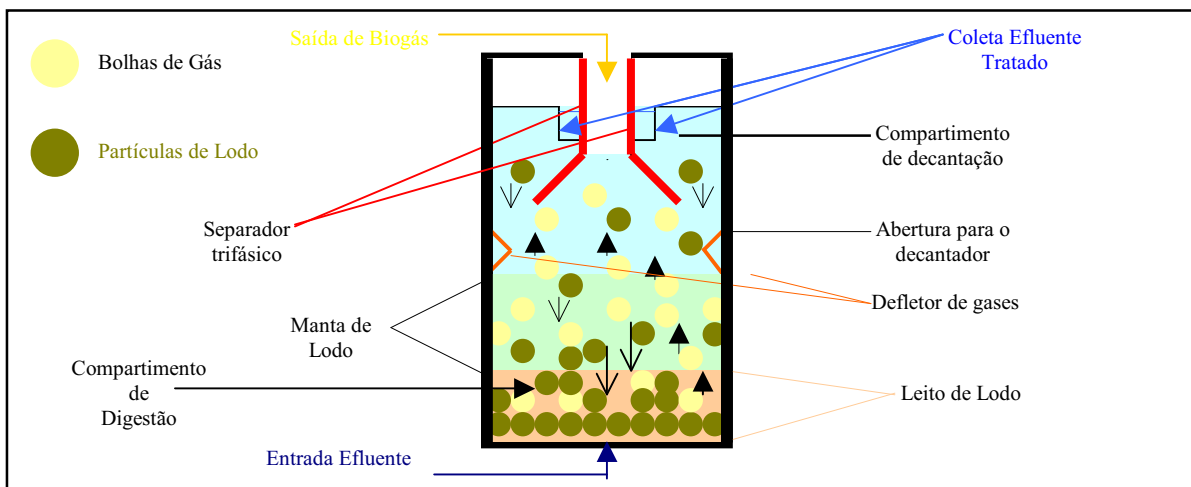


Figura 08 – Desenho esquemático do reator anaeróbio UASB.

Fonte: (CHERNICHARO, 1997).

O reator de manta de lodo é capaz de suportar altas taxas de carga orgânica e a grande diferença, quando comparado com outros reatores da mesma geração, é a simplicidade construtiva e os baixos custos operacionais (CAMPOS *et al*, 1986). São os seguintes princípios mais importantes que governam a operação de um reator de manta de lodo:

- a) As características do fluxo ascendente devem assegurar o máximo contato entre a biomassa e o substrato;
- b) Os curto-circuitos devem ser evitados, de forma a garantir tempo suficiente para a degradação da matéria orgânica;
- c) O sistema deve ter um dispositivo bem projetado, capaz de separar de forma adequada o biogás, o líquido e os sólidos, liberando os dois primeiros e permitindo a retenção do último (separador trifásico);
- d) O lodo na região de manta deve ser bem adaptado, com alta atividade metanogênica específica (AME) e excelente sedimentabilidade. O lodo, se possível, deverá ser granuloso, uma vez que este tipo de lodo apresenta características bem melhores que as do lodo floculento.

3. LODO

O termo Lodo tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos no tratamento de esgotos (VON SPERLING, *et al*, 2001). Nos processos biológicos de tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana, denominada genericamente de lodo biológico ou secundário, composto principalmente de sólidos biológicos, e por essa razão também denominados de biossólido, o termo deve ser utilizado, somente, se as características químicas e biológicas do lodo sejam compatíveis com uma forma de produtiva de utilização, como, por exemplo, na agricultura (ANDREOLI *et al*, 2001). O termo “biossólido” é uma forma de ressaltar os seus aspectos benéficos, valorizando a utilização produtiva, em comparação com a mera disposição final improdutiva, por meio de aterros, disposição superficial no solo, incineração, ou mesmo a falta de gerenciamento do subproduto.

O gerenciamento do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento é uma atividade de grande complexidade e alto custo, que, se for mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados destes sistemas, já que os contaminantes removidos dos efluentes podem voltar ao meio devida falta de gestão (VON SPERLING, 1996). A importância da prática foi reconhecida pela Agenda 21, item do protocolo de Quioto, o qual o Brasil é signatário, que inclui o tema “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos”, definindo as seguintes orientações para a sua gestão: a redução da produção, o aumento máximo da reutilização e da reciclagem e a promoção de depósitos ambientalmente saudáveis. (ANDREOLI, *et al*, 2001).

As exigências da sociedade e das agências ambientais por melhores padrões de qualidade ambiental tem se refletido nos gestores de públicos ou privados dos serviços de saneamento (GONÇALVES, 1998). Devido aos baixos índices de tratamento de esgotos ainda verificados no Brasil, há uma perspectiva de um aumento significativo no número de estações de tratamento de esgotos, em decorrência, da produção de lodo. Em alguns estados, os órgãos ambientais passaram a exigir a definição técnica da disposição final de lodo nos processos de licenciamento. Estes aspectos demonstram que a gestão de biossólidos é um problema crescente no Brasil, com uma tendência de um rápido agravamento nos próximos anos. Hoje no país a situação só pode ser estimada.

3.1 - Produção de Lodo nos Sistemas de Tratamento de Esgotos

De maneira geral, são os seguintes subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgotos: material agregado; areia; espuma; lodo primário; lodo secundário; lodo químico (se houver a etapa físico-química). O tratamento de subprodutos sólidos gerados nas diversas unidades é uma etapa essencial do tratamento dos esgotos. Ainda que o lodo possa na maior parte das etapas do seu manuseio ser constituído de mais de 95% de água, apenas por convenção é designado por fase sólida, visando distingui-lo do fluxo do líquido sendo tratado, a fase líquida (AISSE *et al*, 1999).

Ao se planejar o gerenciamento do lodo, os seguintes aspectos necessitam ser levados em consideração e quantificados:

- Produção de Lodo na fase líquida;
- Descarte de Lodo na fase líquida;
- Descarte de Lodo na fase sólida.

A produção do lodo a ser gerado é função precípua do sistema de tratamento utilizado para a fase líquida (ANDREOLI, *et al*, 2001). Em qualquer tipo de tratamento de biológico irá haver a produção de lodo. Os processos recebem o esgoto bruto em seus decantadores primários, e daí o lodo primário é gerado, composto pelos sólidos sedimentáveis do esgoto bruto. Na etapa biológica do tratamento, tem-se o lodo denominado biológico ou lodo secundário, que é a própria biomassa que cresceu às custas do alimento fornecido pelo afluente. Caso a biomassa não seja removida, ela tende a se acumular no sistema, podendo eventualmente sair com o efluente final, deteriorando sua qualidade em termos de sólidos em suspensão e matéria orgânica (VON SPERLING, 1996).

É possível, dependendo do tipo de sistema, que o lodo primário pode ser enviado para o tratamento juntamente com o lodo secundário, e sendo assim, como denominação para essa mistura, o lodo misto. Em sistemas de tratamento que envolve a etapa físico-química, visando melhorar o desempenho do decantador primário, a qualidade do efluente secundário, (ANDREOLI, *et al*, 2001).

Em todos estes casos, é necessário o descarte do lodo, ou seja, sua retirada da fase líquida. No entanto, nem todos os sistemas de tratamento de esgotos necessitam do descarte contínuo de biomassa. Alguns sistemas de tratamento conseguem armazenar o lodo por todo o horizonte de operação da estação, como por exemplo, as lagoas facultativas, outros sistemas permitem um descarte apenas eventual, como os reatores anaeróbios, e por último, existem os casos em que o lodo requer uma retirada contínua ou bastante freqüente (Lodos Ativados). O lodo biológico descartado também é denominado lodo excedente (LUDUVICE, 1992).

Todos os processos de tratamento são iniciados pelo tratamento preliminar, onde há, necessariamente, a geração de material gradeado e areia, iniciando o processo de subprodutos do tratamento. A espuma é variável de processo para processo, podendo ou não ocorrer sistematicamente. O lodo primário só é gerado na etapa de tratamento primário, onde há a decantação primária. O lodo secundário é gerado em todos os processos de tratamento biológico. O tipo de lodo varia, distinguindo-se em aeróbios (estabilizados), aeróbios (não estabilizados). A seguir é apresentada uma descrição resumida dos principais tipos de subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgotos (VON SPERLING *et al*, 2001 e METCALF e EDDY 1991).

- **Sólidos Grosseiros** – originados na Grade. São os sólidos removidos no gradeamento. Incluem todos os sólidos, orgânicos e inorgânicos, com dimensões superiores ao espaço livre entre grades. O material orgânico varia em função das características do sistema de esgotamento e da época do ano. A remoção pode ser manual ou mecânica;
- **Areia** – originados no Desarenador. A areia usualmente compreende os sólidos inorgânicos mais pesados, que sedimentam com velocidades relativamente elevadas. A areia é removida em unidades denominadas desarenadores, que são decantadores com um baixo tempo de detenção hidráulica, suficiente apenas para a sedimentação da areia. No entanto, dependendo das condições de operação, podem ser removidos também matéria orgânica e óleos e graxas;
- **Escuma** – originada no Desarenador e Decantador primário. A escuma removida nos decantadores primários consiste de materiais flutuantes raspados da superfície, contendo graxa, óleos vegetais e minerais, gordura animal, sabões, papel, algodão, resíduos de comida, cascas de vegetais e frutas, cabelo, pontas de cigarro e materiais similares. O peso específico da escuma é inferior a 1,0 e geralmente em torno de 0,95. Os desarenadores normalmente não possuem equipamentos para a remoção da escuma. No tratamento secundário, os reatores biológicos também produzem escuma, contando em sua composição com a presença de bactérias que se desenvolvem em condições ambientais específicas. Esta escuma é usualmente removida nos decantadores secundários

por raspagem da superfície. Lagoas de estabilização e reatores anaeróbios podem também apresentar espuma;

- **Lodo Primário** – originada pelos tanques sépticos e decantador primário. Os sólidos removidos por sedimentação nos decantadores primários constituem o lodo primário. O lodo primário pode exalar um forte odor, principalmente se ficar retido um tempo elevado nos decantadores primários, em condições de elevada temperatura. O lodo primário removido em tanques sépticos permanece um tempo elevado o suficiente para proporcionar sua digestão anaeróbia;

- **Lodo Biológico Aeróbio (não estabilizado)** – originado pelos lodos ativados convencionais; reatores aeróbios com biofilmes – alta carga (filtro biológico de alta carga, biofiltros aerados submersos e biodiscos). O lodo biológico excedente (lodo secundário) compreende a biomassa de microrganismos aeróbios gerada às custas da remoção da matéria orgânica (alimento) dos esgotos. Esta biomassa está em constante crescimento, em virtude da entrada contínua de matéria orgânica nos reatores biológicos. Para manter o sistema em equilíbrio, aproximadamente a mesma massa de sólidos biológicos gerada deve ser removida do sistema. Caso o tempo de permanência dos sólidos no sistema seja baixo e haja satisfatória disponibilidade de alimento, os sólidos biológicos conterão maiores teores de matéria orgânica em sua composição celular. Estes sólidos não se encontram estabilizados (digeridos), necessitando de uma etapa, posterior, de digestão. Caso contrário, haveria emanção de maus odores pelo lodo durante seu tratamento e disposição final, através da decomposição anaeróbia da matéria orgânica em condições não controladas;

- **Lodo Biológico Aeróbio (estabilizado)** – originado pelos Lodos Ativados – aeração prolongada e nos Reatores aeróbios com filmes – baixa carga (filtro biológico de baixa carga, biodisco, biofiltro aerado). Este lodo biológico é também predominantemente constituído por microrganismos aeróbios que crescem e se multiplicam às custas da matéria orgânica dos esgotos brutos. No entanto, nos sistemas de baixa carga, a disponibilidade de alimento é menor, e a biomassa fica retida mais tempo no sistema, predominando assim as condições de respiração endógena. Em decorrência, a biomassa utiliza as próprias reservas de matéria orgânica de composição do protoplasma celular, resultando em um lodo com menor teor de matéria orgânica (lodo digerido) maior teor de sólidos inorgânicos. Este lodo não requer uma etapa de digestão posterior;

- **Lodo Biológico Anaeróbio (estabilizado)** – originários pelas Lagoas de estabilização facultativas, lagoas anaeróbias facultativas, lagoas aeradas de mistura completa, lagoas de decantação e Reatores anaeróbios (Reatores UASB, filtros anaeróbios). Nos reatores anaeróbios e no lodo de lagoas de estabilização predominam condições anaeróbias. A biomassa anaeróbia também cresce e se multiplica às custas da matéria orgânica. Nestes processos de tratamento, usualmente a biomassa fica retida um longo tempo, no qual ocorre a digestão anaeróbia do próprio material celular. Nas lagoas de estabilização, o

lodo é constituído ainda de sólidos de esgoto bruto sedimentados, bem como algas mortas. Este lodo não requer uma etapa de digestão posterior;

- **Lodo Químico** – originado pelo decantador primário com a precipitação química e lodos ativados com precipitação química de fósforo. Este lodo é usualmente resultante da precipitação química com sais metálicos com cal. A preocupação com odores é menor que com o lodo primário, embora estes possam ocorrer (somente no caso de uso de cal como coagulante). A taxa de decomposição do lodo químico nos tanques é menor que a do lodo primário.

3.2 - Processamento do Lodo

O lodo de um sistema de tratamento de esgoto necessita de acompanhamento e controle em todas as fases, para que todo o sistema de tratamento de efluentes seja eficiente. Na tabela 03 são demonstradas as etapas de gerenciamento do lodo e seus objetivos.

Tabela 03 – Principais etapas do gerenciamento do lodo.

Etapa	Descrição
Adensamento	Remoção de umidade (redução de volume)
Estabilização	Redução de matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)
Condicionamento	Preparação para a desidratação (principalmente mecânica)
Desaguamento	Remoção de umidade (redução de volume)
Higienização	Remoção de organismos patogênicos
Disposição Final	Destinação final dos subprodutos

Fonte: (VON SPERLING, 2001).

A incorporação de cada uma das etapas do processamento do lodo depende das características do lodo tratado, ou seja, do sistema de tratamento utilizado para a fase líquida, bem como da etapa de tratamento do lodo subsequente e da disposição final (GONÇALVES e PASSAMANI 2000).

O adensamento ou espessamento é um processo físico de concentração de sólidos no lodo visando reduzir sua umidade e, em decorrência, seu volume, facilitando as etapas subsequentes de tratamento do lodo.

A estabilização visa atenuar o inconveniente de maus odores no tratamento e manuseio do lodo. A redução dos odores é alcançada através da remoção da matéria orgânica biodegradável presente no lodo.

O condicionamento é um processo de preparação do lodo, através da adição de produtos químicos (coagulantes, polieletrólitos) para aumentar sua aptidão ao desaguamento e melhorar a captura de sólidos nos sistemas de desidratação do lodo.

A desidratação ou desaguamento do lodo é a próxima fase do processo, que pode ser realizada por métodos naturais e mecânicos. O objetivo desta fase é remover a água e reduzir ainda mais o volume, produzindo lodo com o comportamento mecânico próximo ao dos sólidos. A desidratação do lodo tem impacto importante nos custos de transporte e destinação final, além de influenciar de maneira decisiva o manuseio do lodo, já que o comportamento mecânico deste varia com o teor de umidade (VON SPERLING, *et al*, 2001).

A desinfecção ou higienização do lodo é uma operação necessária se seu destino for a reciclagem agrícola, já que os processos de digestão anaeróbia e aeróbia geralmente empregados não reduzem o nível de patógenos a patamares aceitáveis. Para a incineração ou disposição do lodo em aterro, a higienização não é necessária (FERNANDES, 2000).

Dentro de cada etapa do processo, há variantes, as quais são listadas na tab. 04, sendo elas as mais utilizadas no meio. Os sistemas de tratamento de lodo possibilitam diversas combinações de operações e processos unitários, compondo distintas seqüências, em função das características do lodo, dos processos de tratamento de efluentes utilizados e dos métodos de disposição final do lodo empregado.

Tabela 04 – Etapas do gerenciamento de lodo e principais processos utilizados

Adensamento	Estabilização	Condicionamento	Desidratação	Higienização	Disposição Final
- Adensamento por gravidade; - Flotação; - Centrífuga; - Filtro prensa de esteiras.	- Digestão anaeróbia; - Digestão aeróbia; - Tratamento térmico; - Estabilização química.	- Condiciona/to químico; - Condiciona/to térmico.	- Leitões de secagem; - Lagoas de lodo; - Filtro prensa; - Centrífuga; - Filtro prensa de esteiras; - Filtro a vácuo; - Secagem térmica.	- Adição de cal (caleação); - Tratamento térmico; - Compostagem; - Oxidação úmida; - Outros (exemplo: radiação gama, solarização)	- Reciclagem agrícola; - Recuperação de áreas degradadas; - Landfarming (disposição no solo); - Uso não agrícola (fabricação de lajotas, combustível) - Incineração; - Oxidação úmida; - Aterro sanitário.

Fonte: (VON SPERLING, *et al*, 2001).

4. BIOGÁS

“Tudo leva a crer que o gás dos pântanos foi descoberto por Shirley em 1667. No entanto, foi só um século mais tarde que foi reconhecida a presença de metano no gás dos pântanos. Já no século XIX, Ulysse Gayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbia de uma mistura de estrume e água, a 35°C, conseguindo obter 100 litros de gás por m³ de matéria. Em 1884, Louis Pasteur, ao apresentar à Academia das Ciências os trabalhos do seu aluno, considerou que esta fermentação podia constituir uma fonte de aquecimento e iluminação” (CLASSEN et al, 1999).

Na Índia, a idéia de aproveitar o gás metano produzido por digestão anaeróbia, já não era estranha em 1859, quando numa colônia de leprosos, em Bombaim, se realizou a primeira experiência de utilização direta de biogás. Cerca de 30 anos depois, em 1895, teve lugar a primeira experiência européia, com a utilização do biogás para iluminação de algumas ruas da cidade na Inglaterra. A partir desta, surgiram outras experiências, motivadas principalmente pelo entusiasmo inicial que este processo atingiu. Apesar disso, este combustível não conseguiu emplacar como o substituto dos tradicionais.

Como tal, a exploração do biogás tem sido bastante reduzida, limitando-se a ser utilizado em alguns casos esporádicos. Foi apenas nos anos 40, devido a carências energéticas significativas, provocadas pela II Guerra Mundial, que o biogás voltou a ser utilizado, quer na cozinha e no aquecimento das casas, quer para alimentação de motores de combustão interna (COSTA, 2006).

Nas décadas de 50 e 60, a relativa abundância das fontes de energia tradicionais, desencorajou a recuperação do biogás na maioria dos países desenvolvidos, e apenas em países com poucos recursos de capital e energia, como a Índia e a China, o biogás desempenhou um papel de certa importância, sobretudo em pequenos aglomerados rurais.

A partir da crise energética dos anos 70, o gás metano dos digestores anaeróbios voltou a despertar o interesse geral conduzindo a um aumento da sua produção nos países europeus.

4.1 Características do Biogás

O Biogás é uma mistura gasosa resultante da degradação anaeróbia da matéria orgânica dos resíduos sólidos depositados em aterros sanitários e dos efluentes industriais e esgotos domésticos, sendo formado principalmente por metano e dióxido de carbono, em média em partes iguais. Quanto maior a formação de metano, mais energia por unidade de massa o biogás contém. Há ainda dezenas de substâncias, como o gás sulfídrico causador de mau cheiro, traços de siloxinas, que reduzem a vida útil dos equipamentos de uso energético, e vapor d'água (GOLDEMBERG, 2006).

O biogás um gás incolor, geralmente inodoro (se não contiver demasiadas impurezas) e insolúvel em água. A composição média da mistura gasosa que forma o biogás é mostrada na tabela 05.

Tabela 05 – Composição média biogás

Composto	Porcentagem na Mistura Gasosa (%)
Metano (CH ₄)	50 a 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 a 40
Hidrogênio (H ₂)	1 a 3
Azoto (N ₂)	0.5 a 2.5
Oxigênio (O ₂)	0.1 a 1
Gás Sulfúrico (H ₂ S)	0.1 a 0.5
Amoníaco (NH ₃)	0.1 a 0.5
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0.1
Água (H ₂ O)	Variável

Fonte: Adaptado (ZACHOW, 2000).

Devido à presença do metano, o Biogás é um gás combustível, sendo o seu poder calorífico inferior (P.C.I.) cerca de 5500 kcal/m³, quando a proporção em metano é aproximadamente de 60%. A tabela 06 mostra a variação do poder calorífico do biogás em relação à composição, e a título de comparação, a tabela 07 que segue apresenta os P.C.I.s para outros gases correntes.

Tabela 06 – Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás

Composição Química Biogás	Peso Específico (kg/Nm³)	P. C. I. (kcal/kg)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01
95% CH ₄ , 05% CO ₂	0,7768	10.469,60
99% CH ₄ , 01% CO ₂	0,7268	11.661,02

Fonte: (AVELLAR, 2001).

Tabela 07 – Comparação PCI biogás com outros gases.

Gás	P.C.I. (kcal/Nm³)
Metano	8500
Propano	22000
Butano	28000
Gás de Coqueria	4400
Gás de Cidade	4000
Gás Natural	8554
Biogás	5500

Fonte: Adaptado de ALVES, 2000 e ZACHOW, 2000.

O biogás é um gás leve e de fraca densidade. Mais leve do que o ar, contrariamente ao butano e ao propano, ele suscita menores riscos de explosão na medida em que a sua acumulação se torna mais difícil. A sua fraca densidade implica, em contrapartida, que ele ocupe um volume significativo e que a sua liquefação seja mais difícil, o que lhe confere algumas desvantagens em termos de transporte e utilização.

O biogás gerado pela indústria cervejeira possui como valor mais conservativo o poder calorífico inferior na ordem de 20 MJ/Nm³, considerando assim que possui cerca de 60% de metano na composição total do gás (ETHERIDGE, 2003).

O biogás, em condições normais de produção, devido ao seu baixo teor de monóxido de carbono (inferior a 0,1%) não é tóxico, contrariamente, por exemplo, ao gás de cidade que é o gás

levado por tubulação aos consumidores, a partir de uma usina, podendo se constituir de gás manufacturado e gás natural usado para enriquecimento, cujo teor de CO neste gás, próximo dos 20%, é mortal.

Por outro lado, devido às impurezas que contém, o biometano é muito corrosivo. O gás mais corrosivo desta mistura é o sulfureto de hidrogênio que ataca, além de outros materiais, o cobre, o latão, e o aço, desde que a sua concentração seja considerável. Quando o teor deste gás é fraco, é sobretudo o cobre que se torna mais sensível. Para teores elevados, da ordem de 1% (excepcionais nas condições normais de produção do biogás) torna-se tóxico e mortal. A presença do sulfureto de hidrogênio pode constituir um problema a partir do momento em que haja uma combustão do gás e que sejam inalados os produtos desta combustão, dado que a formação do dióxido de enxofre (SO₂) é extremamente nocivo, causando, nomeadamente, perturbações a nível pulmonar.

O amoníaco, sempre em concentrações muito fracas, pode ser corrosivo para o cobre, sendo os óxidos de azoto libertados durante a sua combustão, igualmente tóxicos. Os outros gases contidos no biogás, não suscitam problemas em termos de toxicidade ou nocividade. O gás carbônico, em proporção significativa (35%), ocupa um volume perfeitamente dispensável e obriga, quando não suprimido, a um aumento das capacidades de armazenamento. O vapor de água pode ser corrosivo para as canalizações, depois de condensado. A tab. 08 demonstra a equivalência energética entre o biogás e outros combustíveis utilizados no dia a dia.

Tabela 08 – Equivalência energética biogás

1 m³ de biogás = 5500 kcal, é equivalente a:	
1,7 m ³ de metano	0,25 m ³ de propano
0,8 l de gasolina	1,3 l de álcool
2 kg de carboneto de cálcio	0,7 l de gasóleo
6,5 kw/h de electricidade	2,7 kg de madeira
1,4 kg de carvão de madeira	0,2 m ³ de butano

Fonte: Adaptado de (ZACHOW, 2000).

Tabela 09 – Densidade dos gases em estudo

Gás	Densidade (kg/m ³)	Condições de Temperatura e Pressão
Biogás	1,20	T = 20 °C e P = atm
Gás Natural	0,60	T = 20 °C e P = atm
Gás Liquefeito de Petróleo	2,10	T = 15 °C e P = atm

Fonte: Adaptado de CALDAS, 2006 e COMGAS (2008).

Tabela 10 – Poder Calorífico dos gases em estudo

Gás	Poder Calorífico (kcal/unidade)
Biogás (m ³)	5.500
Gás Natural (m ³)	9.400
Gás Liquefeito de Petróleo (kg)	11.800

Fonte: Adaptado de CTGÁS Centro de Tecnologias do Gás (2008) e COMGAS (2008).

4.2 Cálculos para comparação dos gases em estudo

Para obter um número de correlação entre os gases em estudo, foi considerado a massa de 1 quilograma e as densidades citadas na tabela 09, aplicada na fórmula da densidade:

Fórmula densidade:

$$d = \frac{m}{v} \quad \text{ou} \quad v = \frac{m}{d}$$

$$V_{\text{Biogás}} = 1 / 1,20 = 0,833 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{GLP}} = 1 / 2,10 = 0,476 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{GN}} = 1 / 0,60 = 1,666 \text{ m}^3$$

Onde,

d = densidade (kg/m³)

m = massa (kg)

v = volume (m³)

V_{Biogás} = Volume biogás

V_{GLP} = Volume GLP

V_{GN} = Volume Gás Natural

Como o poder calorífico do GLP é 11.800 kcal/kg e para 1 kg de GLP, tem-se o volume de 0,476 m³, será considerado a relação de 5.616,8 kcal/m³ de GLP.

Ao fazer a comparação dos gases, tem-se que para obter o poder calorífico de 1 m³ de GLP equivale a 0,98 m³ de Biogás e que 1 m³ de Gás Natural equivale a 0,58 m³ de Biogás.

Tabela 11 – Relação dos volumes dos gases e poder calorífico comparados ao biogás

Gás	Poder Calorífico (kcal/m ³)	Relação dos gases em função do biogás
Biogás (m ³)	5.500	1
Gás Natural (m ³)	9.400	0,58
Gás Liquefeito de Petróleo (m ³)	5.616,8	0,98

4.3 Utilização do biogás em motogeradores

O biogás pode ser utilizado nas condições em que é gerado, e dependendo da aplicação, pode ser necessária a redução da concentração de H₂S, CO₂, redução da umidade ou mesmo à elevação da pressão. O uso do biogás em motores exige que a redução na concentração de compostos, redução de umidade e principalmente elevação da pressão. A relação entre massa e volume de metano (CH₄) puro é de 0,6 kg/m³ (COSTA, 2006). Energeticamente o biogás purificado corresponde ao Gás Natural Combustível (GNC), sendo que seu poder calorífico é menor quanto maior for a proporção de contaminantes na mistura que o compõe. Em média o poder calorífico é igual a 5.500 kcal/m³ (biogás com 60% CH₄, 40% CO₂), o que corresponde a um litro de óleo Diesel (ALVES,2000).

As características do biogás mudam de acordo com sua composição, com isso a composição dos gases de exaustão é consequência da composição do combustível e também das condições de uso do mesmo. Levando em conta sua composição média e a realização da combustão em presença de ar atmosférico, poderão existir nos fumos da combustão SO_x, NO_x, CO, entre outros poluentes. Para garantir a emissão de poluentes dentro de especificações a purificação do biogás deve ser feita para corrigir as propriedades naturais e também para que o gás atenda as especificações técnicas dos equipamentos de conversão, no caso os motogeradores.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Com os dados iniciais fornecidos pelo sistema de gestão integrado da empresa e com o levantamento de informações relevantes ao processo de secagem do lodo com a utilização do biogás em bibliografia reconhecida, a viabilidade do estudo no caso da indústria foi verificada a partir do cálculo da energia necessária para que se consiga desaguar o lodo.

Os volumes de biogás e lodo provenientes do tratamento de efluentes devem ser conhecidos para o cálculo da energia necessária a secagem do lodo e a energia contida no biogás. De acordo com o sistema de gestão, na indústria analisada os volumes de biogás gerados, respectivamente, nos anos de 2004, 2005, 2006 e 2007 foram 1.228.781 m³, 1.392.015 m³, 1.139.004 m³ e 1.319.786 m³, conforme expresso na Tabela 12. Atualmente o volume é equivalente a 90.000 m³ por mês. O biogás ora produzido nos biodigestores da empresa é enviado aos queimadores, com o propósito de queimá-lo na presença do ar atmosférico para proteger o meio ambiente e assim evitar a emissão de um gás de efeito estufa com poder de aquecimento maior que o gás carbônico.

Para o outro subproduto, o lodo, as produções oriundas dos biodigestores, nos anos de 2004, 2005, 2006 e 2007 foram respectivamente; 1.112,46 t, 1.260,81 t, 935,70 t e 908,42 t, conforme mostrado na Tabela 12. Atualmente na cervejaria estudada é gerado em média o volume de 80 t/mês de lodo a ser encaminhado para a empresa terceira que realiza o tratamento adequado do resíduo pelo método de compostagem. O lodo antes de ser enviado para a sua destinação final é armazenado nos tanques de lodo e depois enviado para centrífugas que o deságua até o teor de umidade ficar em 78%.

Tabela 12 – Volume de Biogás e Lodo Gerado

Ano	Biogás (*1000m³ /ano)	Lodo (toneladas /ano)
2004	1.228,78	1.112,46
2005	1.392,01	1.260,81
2006	1.139,00	935,70
2007	1.319,78	908,42

Fonte: Relatórios de Monitoramento da Cervejaria

Para a verificação, o biogás da indústria foi analisado em um laboratório especializado em análises de biogás na UNESP (Universidade Paulista), campus de Jaboticabal-SP. Cinco amostras de cada reator anaeróbio, alimentado com o efluente da indústria cervejeira, foram retiradas na saída dos respectivos gasômetros a uma temperatura ambiente de 22,2°C. Três amostras de cada

reator foram validadas, pois apresentaram resultados muito semelhantes, perfazendo um total de seis amostras do biogás gerado pela cervejeira.

As amostras do biogás foram retiradas entre 8 e 9 horas da manhã e analisadas entre 14 e 16 horas do mesmo dia, utilizando-se a saída para amostras dos gasômetros para a amostragem com seringas herméticas de polipropileno, 20mL de volume, com vácuo. O gás amostrado foi injetado diretamente das seringas no aparelho. As determinações dos teores de metano (CH_4), Oxigênio (O_2), Nitrogênio (N_2) e dióxido de carbono (CO_2) foram feitas utilizando-se um cromatógrafo de fase gasosa, da marca FINNINGAN, modelo GC 9001 (coluna Poropack Q, com hidrogênio como gás de arraste). A calibração do equipamento foi feita com gás padrão fornecido pela empresa White Martins, a qual apresentava composição de 55,4% de CH_4 , 35,1% de CO_2 , 7,7% de N_2 e 2,1% de O_2 . Os percentuais dos componentes foram determinados com auxílio de um integrador processador DATA JET SP4600.

A tabela 13 mostra a média dos valores encontrados nas análises das amostras do biogás da indústria cervejeira. O resultado apresentado pelas análises do biogás gerado pela cervejeira demonstra o teor de metano em torno de 84%.

Tabela 13 – Média dos valores encontrados nas análises

Reator	Parâmetro Analisado	Resultado (% em massa)
Média Reatores 1 e 2	Dióxido de Carbono (CO_2)	15,207
	Oxigênio (O_2)	0,026
	Nitrogênio (N_2)	0,586
	Metano (CH_4)	84,18

O biogás gerado por cervejeiras, em pesquisas realizadas na Europa, possui metano em torno de 60% na sua composição (ETHERIDGE, 2003). Em aterros sanitários no Brasil, o teor de metano no biogás se dá em torno de 50% em média, e de acordo com a Ficha de Informação de Produto Químico (FISPQ) da Petrobrás para o Gás Natural, o teor de metano na composição deve ser de no mínimo 68%. O biogás gerado na cervejeira analisada possui 84% em média de metano na sua composição total, um valor mais elevado para que considerada viável a geração de energia elétrica, já que nos aterros sanitários existem inúmeros projetos em funcionamento para a geração de energia com biogás. A geração de energia nobre ainda pode ser somada ao fato de poder utilizar a energia térmica produzida nos geradores.

6. DESCRIÇÕES DE PROJETOS E CALCULO DE INVESTIMENTOS

6.1 – Projeto 1 - Aproveitamento do Biogás para Geração de Combustível para Empilhadeiras

6.1.1 - Descrição do Projeto 1

Este processo permite a obtenção de Metano de uso automotivo, de acordo com as normas EUROPÉIAS ($\text{CH}_4 \geq 97\%$; $\text{CO}_2 \leq 2\%$).

Fases características do processo (patente brasileira e européia):

- pré-dessulfurização;
- pressurização em média pressão;
- *stripping* com água sob pressão;
- desoleação e eliminação de hidrocarbonetos superiores;
- depuração e desidratação final (processo PSA em peneiras moleculares)
- compressão em alta pressão (20 MPa para a adequada estocagem)

O processo é completamente automatizado com instrumentação específica (analísadores, pressostatos, controladores de níveis, etc) ligada a um painel de controle centralizado, de forma a monitorar continuamente todos os parâmetros das seqüências de operação por meio de microprocessadores lógicos programáveis.

Dispositivos especiais de segurança integrado ao quadro elétrico asseguram:

- Sinal de Pré-Alarme e Bloqueio da unidade em caso de presença de oxigênio acima dos valores de segurança;
- Eliminação com descarga acompanhada de alarme de Biometano com características não compatíveis com as especificações de pureza exigidas.
- Sistema para a Exclusão Automática de Compressores e Bombas e Ajuste Automático dos Ciclos de Concentração e Secagem conforme a vazão de Biogás disponível.

6.1.2 - Potencialidade do Projeto 1

Balanço de Massa:

O projeto conforme o processo descrito no item 9.1.1, considerou os seguintes dados e resultados:

a) Biogás Bruto: (Informado)		b) Biogás Após a Lavagem	
Vazão	400 m ³ /h	Vazão	~345 m ³ /h
Pressão	0,0004 MPa	Pressão	0,7 MPa
Temperatura	35°C	Temperatura	~25°C
Composição média:	CH ₄ 80 %	Composição média:	CH ₄ >96 %
	CO ₂ 17 %		CO ₂ 0,4 %
	N ₂ < 2,3 %		N ₂ ~ 3,4 %
	O ₂ < 0,2 %		O ₂ ~ 0,2 %
	H ₂ S < 500 ppm		H ₂ S < 50 ppm
	H ₂ O 100%UR		H ₂ O PO – 60°C

c) Custo operacional estimado:

Energia elétrica:	180 kWh
Homem/Hora (técnico):	720 horas/mês
Água:	0,2 m ³ /h
Manutenção:	R\$ 3.000,00 /mês

d) Benefícios:

GNV disponibilizado:	330 m ³ /h
Carbono sequestrado:	~40.000 ton/ano

6.1.3 – Materiais, Equipamentos e Montagem do Projeto 1

Materiais e equipamentos para montagem do Projeto 1: - Resfriador (chiller) com trocador de calor (água gelada/biogás) e filtros de proteção; - Compressores de média pressão; - Pós-resfriador e separador de condensados; - Coluna de absorção; - Separador de água; - Filtro purificador; - Bombas de água; - Torre de expulsão de CO₂; - Concentrador final (PSA); - Reservatório de gás puro a média pressão; - Compressor final (200 bar); - Analisadores CH₄ - O₂ - CO₂; - Quadro elétrico e de comando.

Pré-montagem em fábrica especializada e montagem final na área de instalação nos limites compreendidos no esquema processo de purificação de biogás. Projeto e execução em conformidade com as normas técnicas e ambientais.

Instrumentação completa de toda a unidade (termômetros, manômetros, medidores de vazão e fluxo, indicadores e controles de níveis, atuadores pneumáticos, pressostatos e termostatos, etc) nos limites indicados no esquema de processo. Materiais e acessórios hidráulicos e mecânicos. Todas as válvulas, tubulações, conexões, suportes, necessários à instalação conforme esquema de processo e desenhos de lay-out. Materiais acessórios de instalação elétrica.

6.1.4 – Despesas Não Orçadas para Implantação do Projeto 1

Não foram orçados neste projeto: - Eventuais sistemas de proteção ambiental de emissões; -Terraplanagem; - Iluminação; - Fluidos substituíveis (óleo, água, aditivos, etc); -Meios de transporte horizontais ou verticais de materiais; - Análises de materiais não previstos no fornecimento; - Despesas de transporte e hospedagem de técnicos; -Todos os demais não especificamente citados no escopo de fornecimento.

6.1.5 – Valor Estimado para o Projeto 1 de Purificação do Biogás em Condições Automotivas

Para a planta apresentada considera-se valor para investimento de R\$ 2.600.000,00 (dois milhões e seiscentos mil reais impostos inclusos). Variação para mais ou para menos de 15%.

6.1.6 – Valor Estimado para o de Transporte do Biogás da Estação de Tratamento de Efluentes até PitStop – Projeto 1

- a) Distancia entre áreas: 1035 metros.
- b) Diâmetro da tubulação: 4”
- c) Material utilizado na tubulação: Polietileno de Alta Densidade (PEAD)
- d) Outros Equipamentos: Purgadores de Condensado
- e) Valor Estimado para Transporte Biogás: R\$ 345.000,00 (Trezentos e quarenta cinco mil reais)
- f) Valor Estimado para Construção Civil: R\$ 500.000,00 (Quinhentos mil reais)
- g) Valor orçado de Manutenção Anual: R\$ 36.000,00 (Trinta e seis mil reais)
- h) Somatória dos valores deste item: R\$ 881.000,00 (Oitocentos e oitenta e um mil reais).

6.1.7 – Valor Total para o Projeto 1

Soma dos itens 6.1.5 e 6.1.6

Valor Total: R\$ 3.481.000,00 (Três milhões quatrocentos e oitenta e um mil reais).



Figura 09 – Foto Empilhadeira movida à GLP.

Fonte: Foto obtida na indústria em estudo no dia 15/10/2008.

6.2 – Projeto 2 - Aproveitamento do Biogás para Queima em Turbinas de Cogeração de Energia Elétrica e Térmica

6.2.1 - Descrição do Projeto 2

Este processo permite a obtenção de Biogás com elevado teor de Metano e tecnicamente livre de H₂S, sendo, portanto adequado para queima em caldeiras ou geração de energia elétrica em grupo geradores de combustão interna.

Fases características do processo:

- pré-dessulfurização;
- pressurização em média pressão;
- *stripping* com água sob pressão;
- desoleação e eliminação de hidrocarbonetos superiores;

O processo é completamente automatizado com instrumentação específica (analisadores, pressostatos, controladores de níveis, etc) ligada a um painel de controle centralizado, de forma a monitorar continuamente todos os parâmetros das seqüências de operação por meio de microprocessadores lógicos programáveis.

Dispositivos especiais de segurança integrado ao quadro elétrico asseguram:

- Sinal de Pré-Alarme e Bloqueio da unidade em caso de presença de oxigênio acima dos valores de segurança;
- Eliminação com descarga acompanhada de alarme de Biometano com características não compatíveis com as especificações de pureza exigidas.
- Sistema para a exclusão automática de compressores e bombas e ajuste automático dos ciclos de concentração e secagem conforme a vazão de Biogás disponível.

6.2.2 - Potencialidade do Projeto 2

Balanço de Massa:

O projeto conforme o processo descrito no item 6.2.1, considerou os seguintes dados e resultados:

a) Biogás Bruto: (Informado)		b) Biogás Após a Lavagem	
Vazão	400 m ³ /h	Vazão	~345 m ³ /h
Pressão	0,0004 MPa	Pressão	0,7 MPa
Temperatura	35°C	Temperatura	~25°C
Composição média:	CH ₄ 80 %	Composição média:	CH ₄ 92,6 %
	CO ₂ 17 %		CO ₂ 3,9 %
	N ₂ < 2,3 %		N ₂ ~ 3,2 %
	O ₂ < 0,2 %		O ₂ ~ 0,2 %
	H ₂ S < 500 ppm		H ₂ S < 50 ppm
	H ₂ O 100%UR		H ₂ O 100%UR

c) Custo operacional estimado:

Energia elétrica:	112 KWh
Homem/Hora (técnico):	720 horas/mês
Água:	0,2 m ³ /h
Manutenção:	R\$ 2.000,00 /mês

d) Benefícios:

Energia elétrica gerada:	1MWh
Carbono seqüestrado:	~40.000 ton/ano

6.2.3 – Materiais, Equipamentos e Montagem do Projeto 2

Materiais e equipamentos utilizados no projeto 2: - Resfriador (chiller) com trocador de calor (água gelada/biogás) e filtros de proteção; - Compressores de média pressão; - Pós-resfriador e separador de condensados; - Coluna de absorção; - Separador de água; - Filtro purificador; - Bombas de água; - Torre de expulsão de CO₂ ; - Reservatório de gás puro a média pressão; - Analisadores CH₄ - O₂ - CO₂; - Quadro elétrico e de comando.

Pré-montagem em fábrica especializada e montagem final na área de instalação nos limites compreendidos no Esquema Processo de Purificação de Biogás. Projeto e execução em conformidade com as normas técnicas e ambientais.

Instrumentação completa de toda a unidade (termômetros, manômetros, medidores de vazão e fluxo, indicadores e controles de níveis, atuadores pneumáticos, pressostatos e termostatos, etc) nos limites indicados no esquema de processo. Materiais e acessórios hidráulicos e mecânicos. Todas as válvulas, tubulações, conexões, suportes, necessários à instalação conforme esquema de processo e desenhos de lay-out. Materiais acessórios de instalação elétrica.

6.2.4 – Despesas Não Orçadas para Implantação do Projeto 2

Entre as despesas não orçadas no Projeto 2 estão: - Eventuais sistemas de proteção ambiental de emissões; - Terraplanagem; - Iluminação; - Fluidos substituíveis (óleo, água, aditivos etc); - Meios de transporte horizontais ou verticais de materiais; - Análises de materiais não previstos no fornecimento; - Despesas de transporte e hospedagem de técnicos.

6.2.5 – Valor Estimado para o Projeto 2 - Purificação do Biogás para Queima em Turbinas de Cogeração de Energia Elétrica e Térmica

Para a planta apresentada considera-se valor para investimento de R\$ 1.700.000,00 (um milhão e setecentos mil reais). Variação para mais ou para menos de 15%.

6.2.6 – Valor Estimado para o Transporte do Biogás da Estação de Tratamento de Efluentes até Turbinas – Projeto 2

- a) Distância entre áreas: 290 metros.
- b) Diâmetro da tubulação: 4”.
- c) Material utilizado na tubulação: Polietileno de alta Densidade (PEAD).
- d) Outros Equipamentos: Purgadores de Condensado.
- e) Valor Estimado Transporte do Biogás: R\$ 150.000,00 (Cento e cinquenta mil reais)
- f) Valor Estimado de Construção Civil: R\$ 500.000,00 (Quinhentos mil reais)
- g) Valor Orçado de Manutenção Anual: R\$ 24.000,00 (Vinte e quatro mil reais)
- h) Somatório de valores deste item: R\$ 686.000,00 (Seiscentos e oitenta e seis mil reais)

6.2.7 – Valor Total para o Projeto 2

Soma dos itens 6.2.5 e 6.2.6.

Valor Total: R\$ 2.386.000,00 (Dois milhões trezentos e oitenta e seis mil reais)



Figura 10 – Foto da Caldeira para Geração de Vapor movida à Gás Natural

Fonte: Foto obtida na indústria em estudo no dia 15/10/2008.

6.3 – Projeto 3 - Aproveitamento do Biogás na Queima como Combustível Para Caldeira Geradora de Vapor

6.3.1 - Descrição do Projeto 3

Idem a Descrição do Processo do item 6.2.1.

6.3.2 - Potencialidade do Projeto 3

Idem a Potencialidade do Projeto Proposto do item 6.2.2.

6.3.3 – Materiais, Equipamentos e Montagem do Projeto 3

Idem aos Materiais e Equipamentos do item 6.2.3.

6.3.4 – Despesas Não Orçadas para Implantação do Projeto 3

Idem as Despesas Não Orçadas para Implantação do Projeto 2 item 6.2.4.

6.3.5 – Valor Estimado para o Projeto 3 de Purificação do Biogás para Queima em Caldeiras a Vapor

Para a planta apresentada considera-se valor para investimento de R\$ 1.700.000,00 (um milhão e setecentos mil reais). Variação para mais ou para menos de 15%.

6.3.6 – Valor Estimado para o Transporte do Biogás da Estação de Tratamento de Efluentes até Caldeiras a Vapor – Projeto 3

- a) Distancia entre áreas: 350 metros.
- b) Diâmetro da tubulação: 4”.
- c) Material utilizado na tubulação: Polietileno de Alta Densidade (PEAD).
- d) Outros Equipamentos: Purgadores de Condensado.
- e) Valor Orçado Transporte do Biogás: R\$ 170.000,00 (Cento e setenta mil reais)
- f) Valor Estimado Construção Civil: R\$ 500.000,00 (Quinhentos mil reais)
- g) Valor Orçado de Manutenção Anual: R\$ 24.000,00 (Vinte e quatro mil reais)
- h) Somatória de valores deste item: R\$ 694.000,00 (Seiscentos e noventa e quatro mil reais)

6.3.7 – Valor Total para o Projeto 3

Soma dos itens 6.3.5 e 6.3.6.

Valor Total: R\$ 2.394.000,00 (Dois milhões trezentos e noventa e quatro mil reais).



Figura 11 – Foto da Turbina e Caldeira do Sistema de Cogeração de Energia Elétrica e Térmica movido à Gás Natural

Fonte: Foto obtida na indústria em estudo no dia 15/10/2008.

6.4 – Projeto 4 - Aproveitamento do Biogás na Queima direta em Moto geradores

6.4.1 - Descrição do Projeto 4

Este processo permite a obtenção de Energia elétrica que pode ser interligada à rede existente, com intuito de aumentar o fornecimento de energia e reduzir o consumo produzido pela Cogeração. O biogás com elevado teor de metano é adequado para queima direta em motogeradores.

Para adaptar cada motogerador movido à gasolina para queimar Gás Natural ou Biogás serão necessários os seguintes equipamentos: 01 Chave Comutadora; 01 Caixa Coletiva; 01 Redutor de Pressão; 01 Válvula Abastecimento tipo Esfera; 01 Regulador Marcha Lenta; 01 Variador de Avanço Aires; 01 Emulador de Bicos 4 Canais; Mangueiras EPDM diâmetro Interno de 7 mm; Mangueira de Borracha Nitrilica; Misturador de Alumínio; Tubulação de Alta Pressão; Invólucro Estanque para Válvulas.

6.4.2 - Potencialidade do Projeto 4

Considerando a geração de 345 Nm³/h de biogás na Estação de Tratamento de Efluentes, e uma produção diária de 24 h, e 26 dias por mês, resultará em uma produção mensal de 215.280 m³, disponíveis para serem transformados em alguma forma de energia.

O consumo de biogás do conjunto motor/gerador é de 0,646 m³/cv, considerando que 1kWh equivale a 0,7355 cv, temos um consumo de 0,4751 m³/kWh. Um metro cúbico de biogás é equivalente a 6,5 kW/h de energia elétrica e a eficiência dos sistemas de cogeração varia entre 30 e 38%, ou seja, 2,0 – 2,5 kWh (COLDEBELLA e SOUZA, 2006).

O custo da produção de energia elétrica via biogás estão diretamente relacionados aos tempos de amortização do investimento e de operação do sistema. Para as concessionárias, seria interessante e vantajoso incentivar as fontes renováveis alternativas para produção de energia em horários de ponta, o que alivia o sistema e diminui o investimento em usinas de ponta, para tanto seriam necessárias políticas diferenciadas para tarifas na ponta e fora da ponta.

6.4.3 – Materiais, Equipamentos e Montagem do Projeto 4

Para a geração de energia elétrica este projeto associa ao sistema de tratamento, o conjunto motor/gerador composto por um motor da marca Ford de 4,9l e 55cv de potência a 1800 RPM, ano 1998, tradicionalmente utilizado no veículo F-1000 a gasolina e um gerador de baixa marca Kohlback, mod 180LB, 60Hz com capacidade de gerar 44kWh em regime contínuo com custo de implantação de R\$ 25.000,00 (Vinte e cinco mil reais), e para compressão do Biogás foi estimado 04 compressores Wetzel 40 Pés com Reserva de 350 litros Pressure com custo de implantação de R\$ 7.000,00 (Sete mil reais) por compressor.

6.4.4 – Despesas Não Orçadas para Implantação do Projeto 4

Despesas não orçadas no Projeto 4: - Eventuais sistemas de proteção ambiental de emissões; - Terraplanagem; - Iluminação; - Fluidos substituíveis (óleo, água, aditivos etc); - Meios de transporte horizontais ou verticais de materiais; - Análises de materiais não previstos no fornecimento; - Despesas de transporte e hospedagem de técnicos.

6.4.5 – Valor Estimado para o Projeto 4

Atribuindo a necessidade de 4 equipamentos motogeradores considera-se valor para investimento de R\$ 100.000,00 (cem mil reais impostos inclusos), e também 04 compressores onde considera-se o valor R\$ 60.000,00 (Vinte e oito mil reais). Totalizando R\$ 160.000,00 (Cento e sessenta mil reais).

6.4.6 – Valor Estimado para o Transporte do Biogás da Estação de Tratamento de Efluentes até Motogeradores – Projeto 4

Este valor será desconsiderado devido à localização da instalação do motogerador ser muito próxima aos Reatores Anaeróbios que são os produtores do Biogás.

- a) Valor Estimado de Construção Civil: R\$ 105.000,00 (Setenta e cinco mil reais)
- b) Valor Estimado de Manutenção Anual: R\$ 10.000,00 (Dez mil reais)
- c) Somatória de Valores deste item: R\$ 115.000,00 (Oitenta e cinco mil reais).

6.4.7 – Valor Total para o Projeto 4

Soma dos itens 6.4.5 e 6.4.6.

Valor Total: R\$ 275.000,00 (Duzentos e setenta e cinco mil reais).

7. - CÁLCULOS DE RETORNO FINANCEIRO

7.1. - Custos para Cálculos de substituição do Gás Natural pelo Biogás

Foram utilizadas informações da tabela de preços da empresa COMGÁS, obtidas no site da mesma.

Custo do Gás Natural: R\$ 0,0957631 + 0,518029 + 18% ICMS = R\$ 0,724274678 / m³ ou
Custo do Gás Natural para Cálculos: R\$ 0,7243 / m³.

Tabela 14 – Margens Máximas para Cálculo de Gás Natural

Classe	m ³ /mês	Variável R\$/m ³ - Sem ICMS	
		Geração de Energia Elétrica destinada ao consumo próprio ou à venda a consumidor final	Geração de Energia Elétrica destinada à revenda a distribuidor
1	Até 100.000,00 m ³	0,2546415	0,2511106
2	100.000,01 a 500.000,00 m ³	0,1388957	0,1369698
3	500.000,01 a 2.000.000,00 m ³	0,0971096	0,0957631
4	2.000.000,01 a 4.000.000,00 m ³	0,0863189	0,0851220
5	4.000.000,01 a 7.000.000,00 m ³	0,0755296	0,0744823
6	7.000.000,01 a 10.000.000,00 m ³	0,0647388	0,0638412
7	10.000.000,01 a 20.000.000,00 m ³	0,0539495	0,0532014
8	Acima de 20.000.000,00 m ³	0,0215787	0,0212795

Fonte: COMGAS (2008)

Notas:

- 1) Os valores não incluem ICMS.
- 2) Ao valor das margens desta tabela, que já incluem os tributos PIS/PASEP e COFINS, deverá ser acrescido o valor do preço do gás (commodity e transporte) referido nas condições abaixo e destinado a esses segmentos.
- 3) Gás Natural referido nas seguintes condições:
Poder Calorífico Superior: 9.400 Kcal/m³; (39.348,400 kJ/m³ ou 10,932 kWh/m³)
Temperatura = 293,15°K (20° C)
Pressão = 101.325 Pa (1 atm)
- 4) O custo do gás canalizado e do transporte destinados a estes segmentos, já considerados os valores dos tributos PIS/PASEP e COFINS incidentes no fornecimento pela Concessionária, vigentes nesta data, é de:
 - a. R\$ 0,525314/m³, nos casos em que o gás canalizado é adquirido como insumo energético utilizado na geração de energia elétrica destinada ao consumo próprio ou à venda a consumidor final.

b. R\$ 0,518029/m³, nos casos em que o gás canalizado é adquirido como insumo energético utilizado na geração de energia elétrica destinada à revenda a distribuidor.

5) Os valores obtidos em razão de alterações para mais ou menos dos custos indicados no item 4, serão contabilizados em separado por usuário e a estes repassados, nos termos da Cláusula 11ª do Contrato de Concessão.

6) O cálculo do importe deve ser realizado em cascata, ou seja, progressivamente em cada uma das faixas de consumo.

7.2 – Custos para Cálculo de Fornecimento de Energia Elétrica

A empresa em questão possui um contrato de fornecimento de energia elétrica e térmica com outra empresa, denominada EnergyWorks que pratica os valores abaixo:

Energia Elétrica: R\$ 0,1240 / kWh

Energia Térmica: R\$ 0,60 / MJ

7.3 – Comparação entre os Projetos 1, 2, 3 e 4 com Análise de Viabilidade Econômica

Os cálculos para purificação e compressão do biogás foram orçados pela empresa ENIPLAN, bem como a manutenção para estes sistemas. Os gastos para instalação da tubulação que transportará o gás até às áreas de utilização foram fornecidos pela empresa ESTIME, os valores para construção civil e manutenção foram estimados, e os valores para os motogeradores foram pesquisados em sites de venda de equipamentos.

Tabela 15 – Comparação de Custos entre os projetos

	PLANTA PURIFICAÇÃO 1,2 E 3 (ENIPLAN) OU MOTOGERADOR 4	CONSTRUÇÃO CIVIL (ESTIMADO)	TRANSP. BIOGÁS (ESTIMADO)	MANUTENÇÃO ANUAL (ENIPALN)	CUTOS TOTAIS IMPLANTAÇÃO E MANUTENÇÃO NO 1º ANO
PROJETO 01	2.600.000,00	500.000,00	345.000,00	36.000,00	3.481.000,00
PROJETO 02	1.700.000,00	500.000,00	150.000,00	24.000,00	2.386.000,00
PROJETO 03	1.700.000,00	500.000,00	170.000,00	24.000,00	2.394.000,00
PROJETO 04	160.000,00	105.000,00	0,00	10.000,00	275.000,00

Tabela 16 – Base de preços dos custos dos combustíveis e Energia Elétrica

CUSTO GÁS NATURAL	0,7243	R\$ / m ³
CUSTO GLP	0,90	R\$ / m ³
CUSTO BIOGÁS	0	R\$ / m ³
CUSTO ENERGIA ELÉTRICA	0,1240	R\$ / kWh

Tabela 17 – Dados de vazão do biogás gerado e produção de energia elétrica

	Quantidade	Unidade	Referência
VAZÃO DE BIOGÁS GERADO	345	m ³ / h	(X 1 h)
	8.280	m ³ / dia	(x 24 h)
	215.280	m ³ / mês	(x 26 dias)
	2.583.360	m ³ / ano	(x 12 meses)
	Quantidade	Unidade	Referência
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	862,50	kWh	(X 1 h)
	20.700,00	kWh / dia	(x 24 h)
	538.200,00	kWh / mês	(x 26 dias)
	6.458.400,00	kWh / ano	(x 12 meses)

Obs: Para cálculo da Energia Elétrica produzida foram utilizados dados do item 6.4.2.

7.4 – Retorno Financeiro

Considerando a equivalência de 01 metro cúbico de biogás gerado com 01 metro cúbico de Gás Natural consumido ou 01 metro cúbico de Gás Liquefeito de Petróleo, obtivemos os resultados de tempo para retorno dos investimentos dos 04 projetos propostos.

Para o cálculo dos 04 projetos foi considerada a Taxa de Referência de 15 % ao ano, que é a mesma utilizada na empresa, e também os cálculos foram realizados para o modelo de *Payback* Descontado, ou seja, considera o valor do investimento no tempo, ajustando os fluxos de caixa por uma Taxa, trazendo todos os fluxos de caixa a valor presente. O prazo de retorno financeiro da empresa deve ser menor ou igual a 02 anos.

7.4.1 – Cálculo Projeto 01

O projeto 01 referente ao Aproveitamento do Biogás para Geração de Combustível para Empilhadeiras tem custo total de R\$ 3.481.000,00 (Três milhões, quatrocentos e oitenta e um mil reais).

Fórmula para cálculo da conversão do biogás comparado ao GLP e receita gerada.

$$Q_{BxGLP} = Q_{BA} \times E_{B-GLP}$$

$$Q_{BxGLP} = 2.583.360 \times 0,98$$

$$Q_{BxGLP} = 1.149.388,53 \text{ m}^3 / \text{ano}$$

$$R_{BxGLP} = Q_{BxGLP} \times C_{GLP}$$

$$R_{BxGLP} = 1.172.845,44 \times 0,90$$

$$R_{BxGLP} = \text{R\$ } 1.034.449,68 / \text{ano}$$

Onde:

C_{GLP} = Custo do gás liquefeito de petróleo (R\$)

C_{P1} = Custo do Projeto 01 (R\$)

E_{B-GLP} = Equivalência biogás – gás liquefeito de petróleo

Q_{BA} = Vazão do biogás gerado por ano (m^3)

Q_{BxGLP} = Vazão do biogás convertido em GLP (m^3)

R_{BxGLP} = Receita do biogás comparado ao GLP (R\$)

Para cálculo de *Payback Descontado* será utilizado o modelo de fluxo de caixa com valores iguais:

- Investimento = 3.481.000

- Fluxo de Caixa = 1.034.450

- Taxa = 15% ao ano

ANO	FLUXO CAIXA ANUAL	FLUXO CAIXA AJUSTADO	FLUXO CAIXA ACUMULADO AJUSTADO
0	- 3.481.000	- 3.481.000	- 3.481.000
1	1.034.450	899.522	-2.581.478
2	1.034.450	782.193	-1.799.285
3	1.034.450	680.168	-1.119.118
4	1.034.450	591.450	-527.668
5	1.034.450	514.304	-13.363
6	1.034.450	447.221	433.858

O *Payback* está entre os anos 5 e 6 (FCA)

$$\text{Payback} = 5 + \frac{13.363}{447.221} = 5,03 \text{ anos}$$

7.4.2 – Cálculo Projeto 02

O projeto 02 referente ao Aproveitamento do Biogás para Queima em Turbinas de Cogeração de Energia Elétrica e Térmica tem custo total de R\$ 2.386.000,00 (Dois milhões, trezentos e oitenta e seis mil reais).

Fórmula para cálculo da conversão do biogás comparado ao GN e receita gerada

$$Q_{BxGN} = Q_{BA} \times E_{B-GN}$$

$$Q_{BxGN} = 2.583.360 \times 0,58$$

$$Q_{BxGN} = 1.498.348,80 \text{ m}^3 / \text{ano}$$

$$R_{BxGN} = Q_{BxGLP} \times C_{GLP}$$

$$R_{BxGN} = 1.498.348,80 \times 0,7243$$

$$R_{BxGN} = \text{R\$ } 1.085.254,04 / \text{ano}$$

Onde:

$$C_{GN} = \text{Custo do gás natural (R\$)}$$

C_{P2} = Custo do Projeto 02 (R\$)

E_{B-GN} = Equivalência biogás – gás natural

Q_{BA} = Vazão do biogás gerado por ano (m^3)

Q_{BxGN} = Vazão do biogás convertido em GN (m^3)

R_{BxGN} = Receita do biogás comparado ao GN (R\$)

Para cálculo de *Payback* Descontado será utilizado o modelo de fluxo de caixa com valores iguais:

- Investimento = 2.386.000

- Fluxo de Caixa = 1.085.254

- Taxa = 15% ao ano

ANO	FLUXO CAIXA ANUAL	FLUXO CAIXA AJUSTADO	FLUXO CAIXA ACUMULADO AJUSTADO
0	-2.386.000		-2.386.000
1	1.085.254	943.699	-1.442.301
2	1.085.254	820.608	-621.693
3	1.085.254	713.572	91.879
4	1.085.254	620.497	712.377
5	1.085.254	539.563	1.251.940
6	1.085.254	469.185	1.721.125

O *Payback* está entre os anos 2 e 3 (FCA)

$$Payback = 2 + \frac{621.693}{713.572} = 2,87 \text{ anos}$$

7.4.3 – Cálculo Projeto 03

O projeto 03 referente ao Aproveitamento do Biogás na Queima como Combustível Para Caldeira Geradora de Vapor tem custo total de R\$ 2.394.000,00 (Dois milhões, trezentos e noventa e quatro mil reais).

Fórmula para cálculo da conversão do biogás comparado ao GN e receita gerada

$$Q_{BxGN} = Q_{BA} \times E_{B-GN}$$

$$Q_{BxGN} = 2.583.360 \times 0,58$$

$$Q_{BxGN} = 1.498.348,80 \text{ m}^3 / \text{ano}$$

$$R_{BxGN} = Q_{BxGLP} \times C_{GLP}$$

$$R_{BxGN} = 1.498.348,80 \times 0,7243$$

$$R_{BxGN} = \text{R\$ } 1.085.254,04 / \text{ano}$$

Onde:

C_{GN} = Custo do gás natural (R\$)

C_{P3} = Custo do Projeto 03 (R\$)

E_{B-GN} = Equivalência biogás – gás natural

Q_{BA} = Vazão do biogás gerado por ano (m^3)

Q_{BxGN} = Vazão do biogás convertido em GN (m^3)

R_{BxGN} = Receita do biogás comparado ao GN (R\$)

Para cálculo de *Payback* Descontado será utilizado o modelo de fluxo de caixa com valores iguais:

- Investimento = 2.394.000

- Fluxo de Caixa = 1.085.254

- Taxa = 15% ao ano

ANO	FLUXO CAIXA ANUAL	FLUXO CAIXA AJUSTADO	FLUXO CAIXA ACUMULADO AJUSTADO
0	-2.394.000		-2.394.000
1	1.085.254	943.699	-1.450.301
2	1.085.254	820.608	-629.693
3	1.085.254	713.572	83.879
4	1.085.254	620.497	704.377
5	1.085.254	539.563	1.243.940
6	1.085.254	469.185	1.713.125

O *Payback* está entre os anos 2 e 3 (FCA)

$$\text{Payback} = 2 + \frac{629.693}{713.752} = 2,88 \text{ anos}$$

7.4.4 – Cálculo Projeto 04

O projeto 04 referente ao Aproveitamento do Biogás na Queima direta em Moto geradores tem custo total de R\$ 275.000 (Duzentos e setenta e cinco mil reais).

Fórmula para cálculo da conversão do biogás comparado à redução de energia elétrica e receita gerada

$$V_{BxEE} = Q_{BA} \times E_{B-EE}$$

$$V_{BxEE} = 2.583.360 \times 2,0$$

$$V_{BxEE} = 5.166.720,00 \text{ kWh / ano}$$

$$R_{BxEE} = V_{BxEE} \times C_{EE}$$

$$R_{BxEE} = 5.166.720 \times 0,1240$$

$$R_{BxEE} = \text{R\$ } 640.637,28 / \text{ ano}$$

Onde:

$$C_{EE} = \text{Custo da Energia Elétrica (R\$)}$$

C_{P4} = Custo do Projeto 04 (R\$)

E_{B-EE} = Equivalência biogás – energia elétrica (Item 6.4.2)

Q_{BA} = Vazão do biogás gerado por ano (m^3)

V_{BxEE} = Valor do biogás convertido em energia elétrica (kWh)

R_{BxEE} = Receita do biogás comparado à redução no consumo de energia elétrica (R\$)

Para cálculo de *Payback* será utilizado o modelo de fluxo de caixa com valores iguais:

- Investimento = 275.000

- Fluxo de Caixa = 640.637

- Taxa = 15% ao ano

ANO	FLUXO CAIXA ANUAL	FLUXO CAIXA AJUSTADO	FLUXO CAIXA ACUMULADO AJUSTADO
0	-275.000		-275.000
1	640.637	557.076	282.076
2	640.637	484.414	766.489
3	640.637	421.229	1.187.718
4	640.637	366.286	1.554.005
5	640.637	318.510	1.872.515
6	640.637	276.965	2.149.480

O *Payback* está entre os anos 0 e 1 (FCA)

$$Payback = 0 + \frac{275.000}{557.075} = 0,49 \text{ anos}$$

7.5. – Resumo dos Cálculos dos Projetos

	PROJETO 01	PROJETO 02	PROJETO 03	PROJETO 04
Investimento (R\$)	3.481.000	2.386.000	2.394.000	275.000
Fluxo de Caixa (R\$)	1.034.450	1.085.254	1.085.254	640.637
<i>Payback</i> (anos)	2,87	2,87	2,88	0,49

8 – GANHOS AMBIENTAIS

Em relação à poluição atmosférica, insta salientar que a redução da emissão de GEE proporciona divisa através de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), sendo este um dos mecanismos de flexibilização criados pelo Protocolo de Quioto.

O Protocolo de Quioto é um dos mais importantes documentos de combate ao efeito estufa. Foi adotado em dezembro de 1997, em complementação à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, de 1992, tendo entrado em vigor em 16 de fevereiro de 2005, após ratificação da Rússia (PRESSE, 2005).

Sua meta é que os países industrializados, incluídos no Anexo I do Protocolo, reduzam suas emissões combinadas de gases de efeito estufa em pelo menos 5,2 % em relação aos níveis de 1990, até o período entre 2008 e 2012. Tal compromisso, com vinculação legal, pretende produzir uma reversão da tendência histórica de crescimento das emissões iniciadas nesses países há cerca de 150 anos (Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), 2006).

Estudos científicos demonstram que o gás metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) são os principais responsáveis pelo aumento da temperatura média do planeta, contribuindo, respectivamente, com 17% e 50% do efeito estufa (CEPEA-FEALQ, 2004). São conhecidos, pois, como Gases de Efeito Estufa (GEEs).

Apesar do porcentual de contribuição do gás metano ser menor que o do dióxido de carbono para o aumento do efeito estufa, verifica-se que a ação específica daquele é muito mais intensa que a deste. O gás metano (CH_4) é 21 vezes mais ativo na retenção de calor na estratosfera em relação ao gás carbônico (CO_2), conforme tabela abaixo:

Tabela 18 – Potencial de Aquecimento Global

TIPOS DE GASES	EQUIVALENTES EM CO_2 (eCO_2)
CO_2 (Gás Carbônico ou Dióxido de Carbono)	1
CH_4 (Gás Metano)	21
N_2O (Óxido Nitroso)	310
HFC's (Hidrofluorcarbonos)	100 – 3.000
PFC's (Perfluorcarbonos)	5.000 – 10.000
SF_6 (Hexafluoreto de Enxofre)	23.900

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2008)

O reaproveitamento do Biogás como alternativa para consumo de outros gases (GN e GLP) tem grande retorno financeiro quando aplicado em uma Estação de Tratamento de Efluentes de uma Cervejaria na cidade de Jacareí-SP, este retorno financeiro chega aproximadamente duzentos mil reais por mês, mas além dos ganhos financeiros temos também os ganhos ambientais.

Os ganhos relacionados à questão ambiental são provenientes da redução de consumo de Gás Natural ou Gás Liquefeito de Petróleo, ambos são extraídos e processados até chegar a ponto de consumo, utilizando mais energia para essa industrialização, e também atribuindo riscos de vazamento e poluição em relação ao transporte destes gases até o ponto de consumo. O Biogás é um produto gerado no tratamento dos efluentes gerados na Cervejaria e atualmente é queimado atendendo às condicionantes da Licença de Operação, a reutilização deste gás demonstra uma considerável contribuição ambiental.

9 - CONCLUSÃO

Todas as formas de reutilização ou reaproveitamento de energia são consideradas nobres e significativas, pois estamos diante de um grande problema para desenvolver formas de preservar os recursos naturais e reduzir o impacto causado pelos processos industriais.

Com os resultados obtidos é possível aproveitar todo biogás gerado na Estação de Tratamento de Efluentes e deixá-lo em condições para utilização nos 04 projetos, sendo o projeto 04 “Queima direta em Motogeradores”, o mais atrativo em função do cálculo de retorno financeiro ser o menor (0,49 anos) e também pelo valor total do investimento ser o menor comparado aos outros projetos. Outro fator importante para este projeto é o número de equipamentos utilizados para processar e reaproveitar o biogás, e também a dispensa da necessidade de transporte do biogás, evitando outras despesas e riscos de acidentes no gerenciamento do transporte do biogás.

A instalação deste projeto pode implicar em modificações no atual sistema de distribuição de energia elétrica, pois, o projeto proposto deverá ser interligado à rede principal para fornecer a energia nos momentos de produção. Será necessário ainda detalhar os orçamentos estimados neste estudo, bem como, avaliar os custos de adaptar o fornecimento desta energia ao paralelismo da rede de energia elétrica existente.

O projeto é altamente sustentável, visto que, a geração do biogás é inerente ao processo de tratamento de efluentes que por sua vez está vinculado ao processo de fabricação de cerveja. A empresa terá grande economia após o retorno dos investimentos, podendo comercializar os créditos de carbono e obter valores monetários consideráveis após implantação desta nobre reutilização de energia. Considerando também que o grupo possui outras unidades para fabricação de cerveja em outros estados e com Estações de Tratamento de Efluentes na mesma configuração, este projeto poderá ser implantado em todas as unidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AISSE, M. M., VAN HAANDEL, A. C., VON SPERLING, M., CAMPOS, J. R., CORAUCCI FILHO, B., ALEM SABRINHO, P. (1999). Tratamento final do lodo gerado em reatores anaeróbios. In: CAMPOS, J.R. (coord). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. PROSAB. p. 271-300.
- ALVES, J. W. S. (2000). Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos. São Paulo. *Dissertação de Mestrado*. PIPGE / USP.
- ANDRADE NETO, C.O. (1994). Pesquisa referente à experiência brasileira relativa a sistemas de baixo custo para tratamento de águas residuárias. Relatório Final – Volume 1, 228 pp.
- ANDREOLI, C. V., DOMASZAK, S., FERNANDES, F., LARA, A. I. (1997). Proposta preliminar de regulamentação para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Paraná. *SANARE – Revista Técnica da Sanepar*, p 53 – 60, Jan / Jul 1997.
- AVELLAR, L. H. N. (2001). A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental. Guaratinguetá. *Tese de Doutorado*. UNESP.
- BARREDO ALCOLER, M. D. S. (1988). The Effect of pH on Microbial Interations in the presence of propionic acid in anaerobic digestion. Ph.D. Thesis, University of New Castle Upon Tyne, UK
- BARROS, R. T. V., CHERNICHARO, C. A. L., HELLER, L. & VON SPERLING, M. (1995). *Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios. Volume 2: Saneamento*. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 221 pp.
- BIO (2001). *Caderno Especial. O saneamento em números*. Revista Bio, jan/mar 2001. ABES. p. 17 – 36.
- CAMPOS, J. R. & DIAS, H. G. (1989). Potencialidades do Filtro Anaeróbio. *Revista DAE* – 49 – n. 154.
- CAMPOS, J. R., RODRIGUES, B. A. S. & FORESTI, E. (1986). Emprego do filtro anaeróbio para tratamento de efluentes líquidos de indústrias de conservas de carne. *Revista DAE*– 46 – n. 144
- CARVALHO, E. H. (1994). Filtros biológicos anaeróbios: Conceitos básicos, projeto e desenvolvimento. São Carlos: EESC/USP, v.1, 128 p. *Dissertação de Mestrado*. Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- CETESB (1999). *Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – critérios para projeto e operação (Manual Técnico)*. Norma Técnica P-4.320. Homologada pela Diretoria Plena em 28/10/99, ementa D.O. de 4/12/99.

- CHERNICHARO, C. A. L. (1997). *Princípios de Tratamento Biológico de Águas Residuárias Volume 5: Reatores Anaeróbios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 246 pp.
- CHERNICHARO, C. A. L. e CAMPOS, C.M.M. (1995). *Tratamento Anaeróbio de esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da UFMG. Apostila, 65 pp.
- CLASSEN, P. A. M., VAN LIER, J. B., CONTRERAS, A. M. L., VAN NIEL, L. (1999). Utilization of biomass for supply of energy carrier. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 52, p. 740 – 755.
- COLDEBELLA, A. e SOUZA, S. N. M. (2006). Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica com Biogás da Bovino Cultura de Leite. Paraná, 9p.. Artigo publicado no AGRENER 06, Programa de Mestrado do Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná
- COSTA, D. F. (2006). Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto. São Paulo, 194 p.. *Dissertação de Mestrado*. Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia – IEE/EPUSP/FEA/IF da Universidade de São Paulo.
- CUNHA, R. C. A., NETO, V. A. (2000). Fundamentos teóricos do processo de avaliação de risco. In: EMBRAPA Meio Ambiente. *Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Ed. BETTIOL, W., CAMARGO, O. 311 p.
- EPA-822-F-91-001 (1994). Fact Sheet: *Amendments to final sewage sludge use and disposal rule*. Office of Water. Mail code 4304. United States Protection Agency, 2 p.
- EPA-822-F-95-004 (1995). Fact Sheet: *Addition of dioxins/dibenzofurans and coplanar PCB's to the list of pollutants covered by the sewage sludge regulation*. Office of Water. Mail code 4304. United States Protection Agency, 2 p.
- EPA-832-B-93-005 (1995). *Guide to biosolids risk assessments for the EPA Part 503 Rule*. Office of Wastewater Management – Municipal Technology Branch. Chapter 6: Questions and Answers on the Part 503 Risk Assessments; p. 109 – 119.
- ETHERIDGE, S. P. (2003). Biogas Use in Industrial Anaerobic Wastewater Treatment. In: *Energy from Biogas*. CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. São Paulo, pp 23 –24 Apr 2003.
- FERNANDES, C. - Universidade Federal de Campina Grande - <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/UASB01.html>, disponível em 13 de junho de 2007, às 14:33 horas.

- FERNANDES, F. (2000). Estabilização e higienização de biossólidos. *In: Impacto ambiental de uso agrícola do lodo de esgotos*. Ed. Embrapa Meio Ambiente.
- FORESTI, E. (1994). Fundamentos do Processo de Digestão Anaeróbia. *In: Anais III Taller y Seminario Latino Americano: tratamiento anaeróbico de aguas residuales*. Montevideo, Uruguay, pp. 97 – 110.
- FRANK KREITH E MARK S. BOHN, Princípios de Transferência de Calor, Thomson Editora, 2003- São Paulo, 747 p.
- FURUKAWA, N. A., SANTOS, H. F., TSUTIYA, M. T., MIKI, M. K., EBERT, R., DELATORRE, M. C., MAYOR JR., M. S., KAMYAMA, H., MACEDO, L. S., MORAES, I. P. S. (1997). Critérios para o uso dos biossólidos de ETE's da SABESP. *In: AESABESP, SANEAS, v. 10. Anais do VIII Encontro Técnico da Associação de Engenheiros da SABESP*.
- GOLDEMBERG, J. (2006). Introdução. Em: *Biogás: Projetos e Pesquisas no Brasil*. CETESB / Secretaria do Meio Ambiente; Organização: Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer; Responsável Técnico: João Wagner Silva Alves; São Paulo, 184 p.
- GONÇALVES, R.F (1998). Opções tecnológicas para minimização da produtividade de lodos de esgoto no Brasil. *In: Anais do I Seminário sobre Gerenciamento de Biossólidos do Mercosul*. p. 41 a 45.
- GONÇALVES, R. F., PASSAMANI, F. R. F. (2000). Higienização de lodos de esgotos. *In: Gerenciamento de lodos de lagoas de estabilização não mecanizadas*. Ed. ABES – PROSAB.
- GRADY, C.P.L. & LIM H. (1980). *Biological Wastewater Treatment: Theory and Application*. Marcel Dekker, New York, 963 pp.
- GTZ/TBW (1997). Promotion of anaerobic technology for the treatment of municipal and industrial sewage and wastes. *Supraregional sectoral project*.
- HALDSDORF, J. W., BARROS, N. D., TASSIDARO, C. A., COSTA, I. (2004). *Química Tecnológica*. Ed. Pioneira Thomson, São Paulo, 450 p.
- KAZANTSEV, I.E. (1977). *Industrial Furnaces*. Mir Publishers-Moscow, 375pp.
- LETTINGA, G. (1995). Introduction. *In: International course on anaerobic treatment*. Wageningen Agricultural University / IHE Delft. Wageningen, 17 – 18 Jul 1995.
- LETTINGA, G., HULSHOFF POL, L., KOSTER, I. W., WIEGANT, W. M., DE ZEEUW, W. J., RINZEMA, A., GRIN, P. C., ROERSMA, R. E. & HOBMA, S. W. (1984). High-rate anaerobic wastewater treatment using the UASB reactor under a wide range of temperature conditions. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 2, pp. 253 – 284.

- LETTINGA, G., HULSHOF, POL L. W. & ZEEMAN, G. (1996). *Biological Wastewater Treatment. Part 1: Anaerobic wastewater treatment*. Lecture Notes. Wageningen Agricultural University, ed. January 1996.
- LIMONI FILHO, G. & VENTURINI FILHO, W. G. (1998). *Avaliação Energética da Substituição do Arroz Partido por Xarope de Maltose em Cervejaria*. FCA/UNESP – Botucatu, pp 13 – 22.
- LUDUVICE, M. (1992). Uso e disposição de lodos orgânicos – biossólidos. In: *Anais do Seminário Internacional de Tratamento e Disposição de Esgotos Sanitários*, Brasília, DF, p. 85 – 96.
- LUE-HING, C., MATTHEWS, P., NAMER, J., OKUNO, N., SPINOSA, L. (1997). Sludge management in highly urbanized areas. In: Chamelon Press Ltd. London. *A global atlas of wastewater sludge and biosolids use and disposal*. IAWQ Scientific and Technical Report No. 4. 3 p.
- MCCARTY, P. L. (1964). Nutrient requirements and biological solids accumulation in anaerobic digestion. *Advances in Water Pollution Research*, 2, Pergamon Press, London, 305 pp.
- METCALF & EDDY (1991). *Wastewater engineering – Treatment, disposal and reuse*. 3rd Edition. Ed. McGraw-Hill, Inc.
- NOVAES R. F. V. (1986). Microbiology of Anaerobic Digestion. In: *International Seminar Anaerobic Treatment in Tropical Countries*, São Paulo, Brazil.
- ORENLAND, R. S. & POLCIN, S. (1982). Methanogenesis and sulfate reduction: competitive and noncompetitive substrates in estuarine sediments. *Applied and Environmental Microbiology*. 44 pp.
- SANTOS, H. F. (1996). Uso agrícola do biossólido das estações de tratamento de esgotos sanitários (ETEs). Subsídios para elaboração de uma norma brasileira. São Paulo, 74 p. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Mackenzie.
- SANTOS, N. O. (2006). Termodinâmica – Aplicada às Termelétricas – Teoria e Prática. Ed. Interciência 150 p. Rio de Janeiro.
- SOUBES, M. (1994). Microbiología de la digestión anaerobia. In: *Anais III Taller y Seminario Latinoamericano: tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Montevideo, Uruguay, pp 15-28.
- USEPA (2000). *Guide to field storage of biosolids*. EPA / 832 – B – 00 – 007, 134 p.; July 2000.
- U. S. FEDERAL REGISTER (1993). 40 CFR Parts 257, 403 and 503. *Standards for the use or disposal of sewage sludge, p. 9257, Table 1, Rules and Regulations, SubChapter 0 – Sewage Sludge, Part 503 – Standards for the Use of Disposal of Sewage Sludge*, vol 58, nº 32, p. 9387 – 9404.

- VAN HAANDEL, A. C. & LETTINGA G. (1984). *Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um manual para regiões de clima quente*. Epgraf Ed. - Campina Grande, 240 pp.
- VISSER A. (1995). Anaerobic treatment of sulphate containing in waste water. In: *International course of anaerobic treatment*. Wageningen Agricultural University / IHE Delft. Wageningen, 17 – 28 Jul. 1995.
- VON SPERLING, M. (1995). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Belo Horizonte, 240 pp.
- VON SPERLING, M. (1996). *Princípios básicos do tratamento de esgotos*. DESA – UFMG. Belo Horizonte, 211 pp.
- VON SPERLING, M., ANDREOLLI, C. V. & FERNANDES, F. (2001). *Lodo de esgoto: Tratamento e disposição final*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná. Belo Horizonte, 484 p.
- ZACHOW, C. R. (2000). Biogás. Panambi, 12 p. *Dissertação de Graduação*.
- ZEHNDER, A. J. B., INGVORSEN, K. & MARTI, T. (1982). *Micorbiology of the methane bacteria. Anaerobic Digestion 1981*. Elsevier Biomedical Press, Amsterdam, The Netherlands.