

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Diego Hamzagic Mendes

**UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PARA A GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA E SECAGEM DE LODO DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA INDÚSTRIA
CERVEJEIRA**

Taubaté - SP

2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Diego Hamzagic Mendes

**UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PARA A GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA E SECAGEM DE LODO DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA INDÚSTRIA
CERVEJEIRA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos 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. Sebastião Cardoso

Taubaté - SP

2008

M538u

Mendes, Diego Hamzagic.

Utilização do biogás para a geração de energia elétrica e secagem de lodo de estação de tratamento de esgoto na indústria cervejeira./ Diego Hamzagic Mendes. – Taubaté: Unitau, 2008.

83 f. :il;30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté. Faculdade de Engenharia Mecânica. Curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Sebastião Cardoso.

1. Reator Anaeróbio. 2. Secagem Térmica. 3. Biogás.
I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD(21) 665.776 81

DIEGO HAMZAGIC MENDES

**UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E
SECAGEM DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA
INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos
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. Sebastião Cardoso

Data: 13 de fevereiro de 2008

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sebastião Cardoso

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. José Rui Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Jerônimo dos Santos Travelho

**Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais**

Assinatura _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família e amigos, principalmente a minha mãe Hadia Cássia Hamzagic Tramontin, meu pai Horácio Nelson Mendes, minha avó Jurema de Almeida Mendes, ao meu padastro Jorge Luiz Mondo Tramontin, ao amigo Cláudio Ricardo Mariotto e a Maria Beatriz Silva Longo por entender os momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e oportunidades na vida;

A toda minha família pela forte ajuda para o término de mais uma fase na vida;

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

A todo o pessoal da Secretaria do Mestrado em Engenharia Mecânica, principalmente a Helena;

A Kaiser de Jacareí, principalmente o Sr. João Rodrigues, André Iannicelli e Argemiro Campos por todas as informações passadas, necessárias ao estudo;

A Empresa TRIGÁS Brasil, principalmente o Sr. Percival pelas informações sobre os motogeradores propostos por este trabalho;

A UNESP de Jaboticabal, Departamento de Ciências Rurais, em especial ao Luizinho, pela análise do biogás;

Ao Prof. Ederaldo Godoy Jr., pelos contatos fornecidos que permitiram a análise do gás e Eduardo Vargas Pereira, pela ajuda na análise do biogás;

Agradeço principalmente ao meu Orientador Sebastião Cardoso pela instrução de forma clara, ajuda e muita paciência demonstrada desde o início do processo de orientação.

***“ Não adianta olhar pro céu
com muita fé e pouca
luta”***

Gabriel, O Pensador.

RESUMO

A indústria cervejeira necessita para suas operações de matéria prima, energia e água, tendo como produto final a cerveja e efluentes. Para o cumprimento de normas ambientais, a indústria trata seus despejos líquidos através da tecnologia anaeróbia. Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente tratam o efluente (mosto da cerveja e água) gerado na cervejeira. Como característica do tratamento anaeróbio é produzido na estação de tratamento de esgoto biogás e lodo. O gás gerado na estação é rico em metano e com isso pode ser usado como combustível para prover motogeradores, turbinas ou mesmo ser queimado e gerar energia térmica. Esta energia térmica pode ser utilizada para a secagem do lodo, pois este quando seco possui características muito interessantes referentes a agricultura, já que dentro do processo de secagem, o lodo pode ser seco até chegar ao ponto em que sua composição se torna um excelente adubo. Atualmente na indústria em análise o biogás é queimado para evitar que o metano seja emitido para a atmosfera. No caso do lodo, atualmente a empresa envia o material com 78% de umidade para posterior tratamento e compostagem para uma contratada. Com a situação inicial levantada com dados do sistema de gestão da indústria cervejeira e busca de informações em bibliografia reconhecida, o processo de secagem térmica do volume de lodo com o biogás gerado pela própria estação se torna viável. Para a secagem serão utilizados motogeradores providos pelo biogás e com seus gases de escape o lodo será seco no parafuso transportador entre a centrífuga e a caçamba que o leva o lodo à destinação final. A área do parafuso servirá de secador onde os gases serão enviados para a secagem do lodo até que este atinja as características necessárias à agricultura. O gás gerado na estação pode alimentar um grupo de motogeradores gerando energia elétrica e térmica que possuem grande utilidade na indústria tratando um resíduo gerado no local, além de utilizar o gás que no caso é tratado como resíduo.

Palavras Chave – Biogás; Reator Anaeróbio; Lodo; Secagem Térmica; Agricultura.

ABSTRACT

The Brewery industry needs raw material, energy and water for its operation, having beer and effluents as its final products. To be able to comply with the environmental laws, the industry treats its effluents through anaerobic technology. Anaerobic upflow reactors treat the effluent (beer wort and water) generated in the brewery. As it is characteristic of the anaerobic treatments, wastewater solids and biogas are generated. This gas is rich in methane and can, therefore, be used as fuel to feed generators, turbines or even be burned to generate thermal energy. This thermal energy can be used to dry the wastewater solids produced, for when dry they have interesting characteristics for agricultural use. The wastewater solids can be dried to a point they become excellent fertilizer. Nowadays, in the industry herein analyzed, the biogas is burned to avoid methane being thrown into the atmosphere. As to the wastewater solids, the brewery company now sends the material with 78% of humidity for posterior treatment and composting processes to a third party company. From the study of the present situation and of recognized literature on the subject we could conclude that the process of thermal drying of the wastewater solids using the biogas generated by the station itself is possible. For the drying process generators fed by the biogas will be used, the biogas escape gases will dry the wastewater solids in the transportation screw between the centrifuge and the container which takes the wastewater solids to their final destination. The area of the screw will serve as dryer where wastewater solids will receive the gases for the drying process, until they reach the necessary characteristics for agricultural uses. The gas generated in the station may also feed a group of generators that could produce thermal and electrical energy. This process could be of great use to the industry, because it treats the waste generated by the company, besides using the biogas that, in this case, has been treated as waste.

Key Words – Biogas; Anaerobic Reactor; Wastewater Solids; Thermal Drying; Agriculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Volumes de biogás e lodo	22
Figura 02 – Variação dos volumes de biogás e lodo	22
Figura 03 – Volumes mensais de biogás e lodo	23
Figura 04 – Variação dos volumes mensais de biogás e lodo	23
Figura 05 – Fluxograma atual do lodo e biogás	24
Figura 06 – Fluxograma proposto para os subprodutos	26
Figura 07 – Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios	28
Figura 08 – Digestão anaeróbia como tecnologia de integrada de tratamento de esgotos e de recuperação de subprodutos	29
Figura 09 – Esquema simplificado da digestão anaeróbia com os compostos resultantes	31
Figura 10 – Seqüências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia	32
Figura 11 – Seqüências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia com redução de sulfato	37
Figura 12 – Rotas de formação de metano a partir da fermentação de substratos complexos	39
Figura 13 – Esquemas de reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo	44
Figura 14 – Desenho esquemático do reator anaeróbio UASB	46
Figura 15 – Cromatógrafo a gás utilizado nas análises de biogás	62
Figura 16 – Imagens dos queimadores alimentados com o biogás	68
Figura 17 – Centrífuga utilizada para o desaguamento	69
Figura 18 – Lodo após desaguamento	69
Figura 19 – Motogerador proposto	72
Figura 20 – Rosca de transporte da massa do lodo	76
Figura 21 – Imagens da rosca transporte. Respectivamente cobertura em aço e parte interna com a rosca transportando o lodo	76
Figura 22 – Parte interna da rosca de transporte	77
Figura 23 – Espessura do lodo no fundo da rosca de transporte	78

Figura 24 – Sistema de secagem proposto com a entrada e saída dos gases de escape dos motogeradores

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Volumes de biogás e lodo gerado	22
Tabela 02 – Volumes mensais de biogás e lodo	23
Tabela 03 – Vantagens e Desvantagens dos Processos Anaeróbios	27
Tabela 04 – Algumas reações de oxiredução importantes na digestão anaeróbia	40
Tabela 05 – Principais etapas do gerenciamento do lodo	52
Tabela 06 – Etapas do gerenciamento de lodo e principais processos utilizados	54
Tabela 07 – Composição média biogás	57
Tabela 08 – Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás	58
Tabela 09 – Comparação PCI biogás com outros gases	58
Tabela 10 – Equivalência energética biogás	59
Tabela 11 – Resultado análise do biogás	61
Tabela 12 – Média das análises nos reatores 1 e 2	62

LISTA DE ABREVIATURAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
AME	Atividade Metanogênica Específica
CFR	Federal Regulations Code - Código de Regulamentos Federais dos Estados Unidos
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
DBO	Demanda Biológica de oxigênio
DQO	Demanda bioquímica de oxigênio
D.O.	Diário Oficial
ETE	Estação de tratamento de efluentes
GNC	Gás Natural Combustível
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
M.O.	Matéria Orgânica
PCB	Policlorados de Bifenilas
PCI	Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)
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
ST	Sólidos Totais
TOX	Halogenados Orgânicos Absorvíveis
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket

LISTA DE SIGLAS

CEE	Comunidade Econômica Européia
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – São Paulo
DEHNR	North Carolina Department of Environment, Helth and Natural Resources – Departamento de Meio Ambiente, Saúde e Recursos Naturais do Estado da Carolina do Norte (Estados Unidos)
DHEC	Department of Health and Environmental Control – South Carolina – Departamento de Controle da Saúde e Meio Ambiente do Estado da Carolina do Sul (Estados Unidos)
EPA	Environmental Protect Agency – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
GTZ	Deustch Gesellschaft für Technishe Zusammenarbeit – Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – Painel Intergovernamental de Mudança Climática
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
TBW	TBW Naturgerechte Technology – TBW Tecnologia Natural
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change – Convenção sobre Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas
USEPA	United States Environmental Protect Agency – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da Superfície Externa da Massa de Lodo (m^2)
B_i	Número de Biot
c_p	Calor Específico a pressão constante ($J/kg\ K$)
F_0	Número de Fourier
h	Coeficiente de convecção de calor ($W/m^2\ K$)
$h_{\ell v}$	Entalpia de vaporização da água contida no lodo ($kJ/kg\ K$)
K	Condutividade térmica (W/mK)
ℓ	Litro ($10^{-3}\ m^3$)
L	Dimensão característica do esferóide de lodo (m)
$\dot{m}$	Fluxo de massa total do lodo (kg/s)
$\dot{m}_a$	Fluxo de massa de água contida no lodo (kg/s)
$\dot{m}_{ar}$	Fluxo de massa de Ar (kg/s)
$\dot{m}_{as}$	Massa a ser vaporizada do lodo (kg/s)
$\dot{m}_{bg}$	Fluxo de massa do biogás (kg/s)
$\dot{m}_d$	Fluxo massa descarga (kg/s)
$\dot{m}_s$	Fluxo de massa sólida contida no lodo (kg/s)
$\dot{m}_v$	Fluxo de massa de água a ser vaporizada (kg/s)
NO_3^-	Nitrato (Redução)
PCI_{bg}	Poder Calorífico Inferior do Biogás (kJ/kg)
pH	Potencial Hidrogeniônico
PO_4	Fosfato
SO_4^{2-}	Sulfato (Redução)
t	Tempo (s)
T	Temperatura
V	Volume (m^3)
$\dot{V}_{bg}$	Vazão de biogás (m^3/s)
$\dot{W}_{aq}$	Potência necessária ao aquecimento do lodo (W)

$\dot{W}_d$	Potência cedida pelos gases de descarga do motogerador (W)
$\dot{W}_q$	Potência química disponível no biogás (W)
$\dot{W}_s$	Potência necessária para a secagem do lodo gerado na ETE (W)
$\dot{W}_v$	Potência necessária à vaporização da água (W)
ΔT	Variação de Temperatura (°C)
ΔG_0	Variação de Energia Durante as Reações de Oxi-Redução na Digestão Anaeróbia
α	Difusividade Térmica do Material (Lodo) (m ² /s)
θ_0	Diferença de temperatura (T-T ₀) (°C)
θ_i	Diferença de temperatura (T-T _i) (°C)
ρ_{bg}	Massa específica biogás (metano) (kg/m ³)

LISTA DE UNIDADES

atm	Atmosfera
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
cm ³ /s	Centímetro cúbico por segundo
gST/ℓ	Gramas de sólidos totais por litro
h	Hora
J	Joule
J/kgK	Joule por quilograma Kelvin
K	Kelvin
kg	Quilograma
kg/h	Quilograma por hora
kg/Nm ³	Quilograma por normal metro cúbico
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
kg/s	Quilograma por segundo
kJ	Quilojoule
kJ/kg	Quilojoule por quilograma
kJ/kgK	Quilojoule por quilograma Kelvin
kJ/mol	Quilojoule por mol
kJ/Nm ³	Quilojoule por normal metro cúbico
kW	Quilowatt
m	metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
m ² /s	Metro quadrado por segundo
m ³ /ano	Metros cúbicos por ano
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
mg/ℓ	Miligramas por litro

MJ	Megajoule
MJ/Nm ³	Megajoule por normal metro cúbico
mm	Milímetros
mol	Mol – grandeza quantidade de matéria no sistema internacional (SI)
Nm ³	Normal metro cúbico – volume a P = 1 atm e T = 15°C
Nm ³ /ano	Normal metro cúbico por ano
s	Segundo
t	Tonelada
t/mês	Tonelada por mês
W	Watt
W/kgK	Watt por quilograma Kelvin
W/m ² K	Watt por metro quadrado Kelvin
W/mK	Watt por metro Kelvin
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	18
1. Indústria Cervejeira	20
1.1 A Indústria Cervejeira em Análise	20
2. Reatores Anaeróbios	26
2.1 Despejos Passíveis de Serem Tratados Por Via Anaeróbia	26
2.2 Características dos Processos Anaeróbios	27
2.3 Fundamentos da Digestão Anaeróbia	29
2.3.1 Microbiologia da Digestão Anaeróbia	30
2.3.2 Bioquímica da Digestão Anaeróbia	36
2.3.3 Ácidos Voláteis Intermediários	38
2.3.4 Aspectos Termodinâmicos	39
2.3.5 Formação de Metano	40
3. Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB)	43
3.1 Princípios do Processo	44
4. Lodo - Biossólido	48
4.1 Produção de Lodo nos Sistemas de Tratamento de Esgotos	49
4.2 Processamento do Lodo	52
4.3 Secagem Térmica do Lodo	54
5. Biogás	56
5.1 Características do Biogás	57
5.2 Utilização do Biogás em Motogeradores	60
5.3 Biogás da Indústria Cervejeira	60
6. Biossólido na Agricultura	63
6.1. Normalizações	63
6.1.1. Utilização de Biossólidos no Estado de São Paulo	65
7. Secagem do Lodo com o Biogás Gerado no Reator	68
8. Secador	76
CONCLUSÃO	82
Referências Bibliográficas	83

INTRODUÇÃO

Os novos projetos de engenharia devem contemplar prioritariamente o ecossistema e fazer uso de inovações tecnológicas para atender a crescente demanda de energia apresentada pela sociedade moderna, sem negligenciar a preservação do meio ambiente. A atenção dos investigadores deve estar norteadada para propiciar o uso racional da água e o máximo reaproveitamento de energia, principalmente nas indústrias. A meta a ser alcançada não se limita a objetivos financeiros ou econômicos, mas principalmente à preservação da espécie humana através de um desenvolvimento sustentável e permanente do homem no universo. Segundo Capra (2002), “o capitalismo global não terá futuro se não for projetado para ser ecologicamente sustentável e para respeitar os direitos e valores humanos”. Baseado nestes princípios é que se propõe este projeto, o qual estabelece, através de diretrizes teóricas, uma forma de racionalizar o uso de energia nas atividades de uma indústria cervejeira.

Esta investigação contempla um sistema de secagem de lodo proveniente da estação de tratamento de esgoto de uma indústria cervejeira. A meta principal deste trabalho é a utilização do biogás gerado pelo tratamento anaeróbio dos efluentes da empresa visando gerar energia e suprir a demanda deste segmento da indústria. O equipamento sugerido além de produzir energia mecânica deve propiciar a secagem do lodo produzido na indústria.

A produção do gás metano, principal constituinte do biogás, é inerente ao processo de decomposição de produtos orgânicos. Os efluentes das indústrias alimentícias e, sobretudo da indústria cervejeira são dotados de grande potencial para produção de biogás. Na Indústria cervejeira em estudo, o biogás gerado pelos biodigestores é queimado e lançado para atmosfera juntamente com a energia térmica a ele associada. O biogás gerado pela decomposição de matéria orgânica, como por exemplo, em aterros sanitários, quando não é adequadamente coletado, provoca grande poluição ao ar ambiente e em concentrações elevadas seu potencial explosivo coloca em risco a vida circunvizinha. O uso racional do biogás permite converter energia para atender a crescente demanda imposta pela sociedade e evita lançá-lo para atmosfera. O metano, principal constituinte do biogás, possui um potencial relacionado ao aquecimento global cerca de 21 vezes superior que o do gás carbônico quando lançado para a atmosfera (Costa, 2006). Cada tonelada de metano emitida para a atmosfera é equivalente a 21 toneladas de gás carbônico. O poder de aquecimento global do gás metano é muito maior que o

do gás carbônico, por isso a pequena emissão de biogás pode ser considerável quando relacionada às emissões de gases de efeito estufa. É relevante ressaltar que a emissão de carbono regulamentada pelo artigo 12 do Protocolo de Quioto, no que tange os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), pode render ao Brasil cotas de emissões as quais poderão ser trocadas por capital estrangeiro, que devidamente aplicados poderiam assegurar melhoria na situação econômica nacional.

1. INDÚSTRIA CERVEJEIRA

A cerveja é uma das principais bebidas alcoólicas obtidas por fermentação de produtos agrícolas. É produzida a partir de mosto preparado com malte de cevada além de outros componentes tais como o lúpulo, a água e os adjuntos de malte (Limoni, 1998). O mosto compreende uma mistura do malte triturado, já fermentado e água. (Wikipédia, 2007).

Os processos empregados na produção da cerveja geram os efluentes líquidos, resíduos sólidos e emissões atmosféricas. O resíduo mais encontrado nos efluentes da indústria cervejeira é o mosto. O mosto da cerveja por possuir elevada carga orgânica necessita ser tratado para alcançar padrões adequados ao lançamento em corpos d'água sem prejuízos relevantes ao meio ambiente.

O principal resíduo sólido gerado no tratamento do efluente da cervejaria é o lodo proveniente dos tratamentos biológicos destes materiais. No que tange as emissões atmosféricas, parte delas se dá pela emissão de CO₂ ou mesmo em alguns casos pela emissão do biogás. Parte do gás carbônico emitido pela operação da indústria acontece com a queima do biogás, e devido ao grande volume do gás fornecido pelo tratamento, este se torna importante no controle das emissões dos gases para a atmosfera.

1.1 A Indústria Cervejeira em Análise

O efluente líquido da indústria em análise entra na ETE para ser tratado com carga orgânica aplicada média de 10.370 kgDQO/dia, com picos de alta de até 27.300 kgDQO/dia e picos de baixa de 5.000 kgDQO/dia (FEMSA, 2007). A indústria em análise, para atender as normas estabelecidas, deve tratar seus efluentes visando preservar o corpo d'água em que são lançados e o meio ambiente. Quando não se toma o cuidado devido com os efluentes, a alta carga orgânica neles contida, ao ser consumida por microrganismos, os quais se proliferam abundantemente enquanto consomem o oxigênio, trará como consequência a morte dos animais que habitam o corpo d'água.

Para que não ocorra a morte do rio, no Estado de São Paulo existe o Órgão Ambiental (CETESB) que, dentre outras atribuições fiscaliza as ações usuários das águas fluviais. O efluente para atingir os padrões de lançamentos estabelecidos pelo Órgão passa por

tratamentos, que em geral são monitorados pela empresa responsável. Ao final de cada mês, relatórios são enviados à CETESB atestando a eficiência do tratamento. Os relatórios possuem os dados relevantes ao monitoramento da Estação de Tratamento de Efluentes.

As informações geradas são tratadas conforme os procedimentos do sistema de gestão integrada da companhia, o qual engloba as áreas de qualidade, meio ambiente e segurança. O sistema de gestão passa por auditorias que verificam o funcionamento da gestão do processo e possibilita sua melhoria contínua. Este processo iterativo gera confiabilidade nas informações e permite corrigir eventuais falhas no tratamento como um todo.

Para manter as certificações do seu sistema de gestão integrado a empresa além de outras ações, deve garantir que suas atividades gerem o mínimo impacto ao meio ambiente, e em tempos de preocupação ambiental a certificação se torna um marketing necessário e relevante.

O principal problema ambiental da indústria cervejeira é a geração de efluente com elevada carga orgânica. Os resíduos líquidos gerados pela indústria são tratados biologicamente com tecnologia anaeróbia, a qual produz biogás e lodo. O reator anaeróbio de fluxo ascendente em manta de lodo (UASB) da empresa possui capacidade máxima para tratar 585 m³ por hora de efluente. A estação de tratamento de efluentes industriais trabalha com DQO real médio de 1900 mg/ℓ, e o DQO máximo permitido de 2600 mg/ℓ (FEMSA, 2007).

Os volumes de biogás gerados, respectivamente, nos anos de 2004, 2005 e 2006 foram 1.228.781 Nm³, 1.392.015 Nm³ e 1.139.004 Nm³, conforme expresso na tabela 01. Atualmente o volume é equivalente a 90.000 Nm³ por mês. O biogás ora produzido nos biodigestores da empresa é enviado a queimadores, com o propósito de queimá-lo na presença do ar atmosférico para proteger o meio ambiente.

No processo de fermentação anaeróbia de biomassa contida no efluente o tratamento produz biogás e outro subproduto. As produções de lodo oriundas dos biodigestores, nos anos de 2004, 2005 e 2006 foram respectivamente; 1.112,46 t, 1.260,81 t e 935,70 t, conforme mostrado na tabela 01. Atualmente na cervejaria é gerado em média o volume de 85 t/mês de lodo a ser encaminhado para a empresa que realiza o serviço 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%. (FEMSA, 2007). A figura

01 mostra os volumes de biogás e lodo gerados durante o ano. A figura 02 mostra a variação durante os anos.

Tabela 01 – Volumes de biogás e lodo gerado.

Ano	Biogás (*1000m ³ /ano)	Lodo (m ³ /ano)
2004	1.228,78	1.308,78
2005	1.392,01	1.483,30
2006	1.139,00	1.100,82

Fonte: FEMSA, 2007.

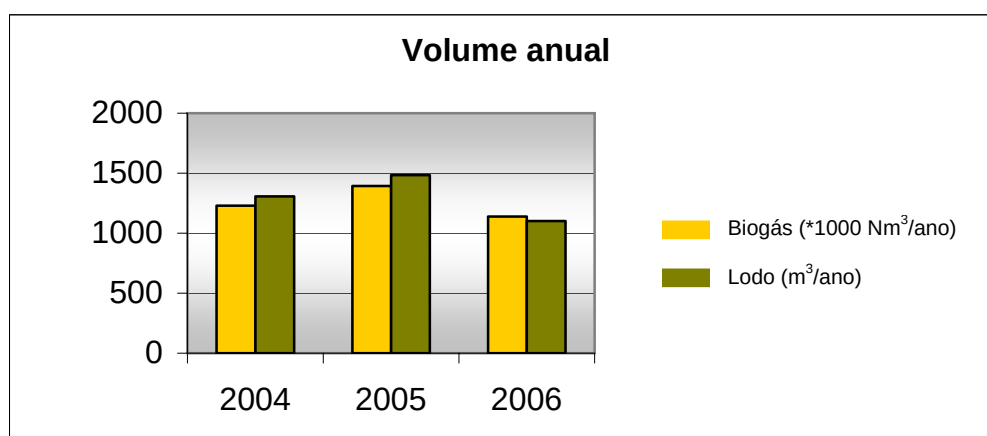


Figura 01 – Volumes de biogás e lodo.

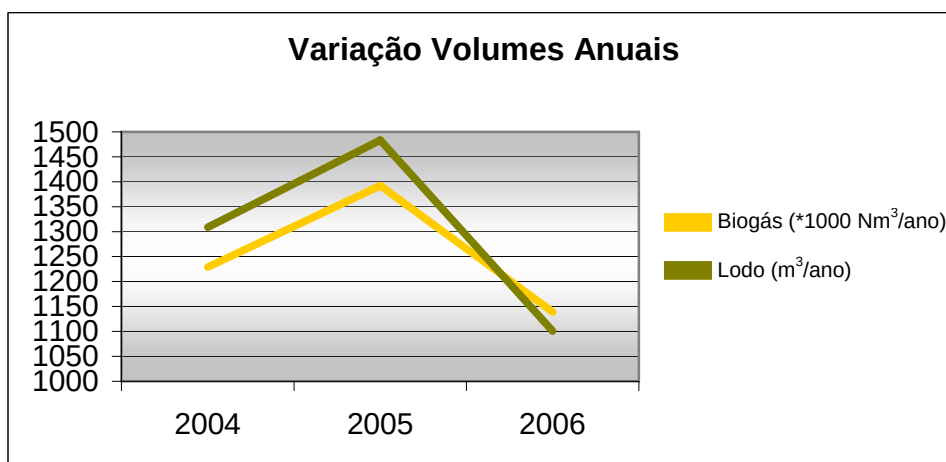


Figura 02 – Variação dos volumes de biogás e lodo.

A tabela 02 mostra as médias de subprodutos gerados durante um mês para ser comparada a geração mensal atual. A figura 03 demonstra os volumes mensais e a figura 04 mostra a variação dos volumes mensais médios.

Tabela 02 – Volumes mensais de biogás e lodo.

	Biogás (*1000Nm³/mês)	Lodo(m³/mês)
Média 2004	102,39	109,07
Média 2005	116,00	123,61
Média 2006	94,91	91,74
atual	90,00	100,00

Fonte: FEMSA, 2007.

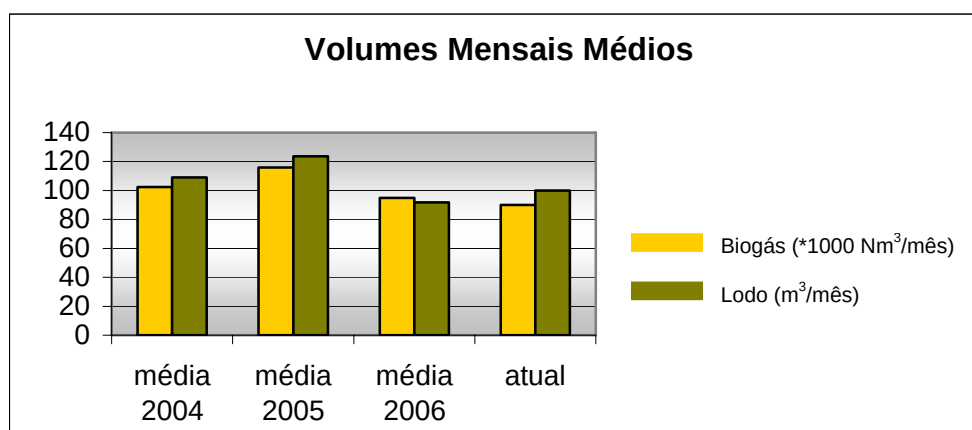


Figura 03 – Volumes mensais de biogás e lodo.

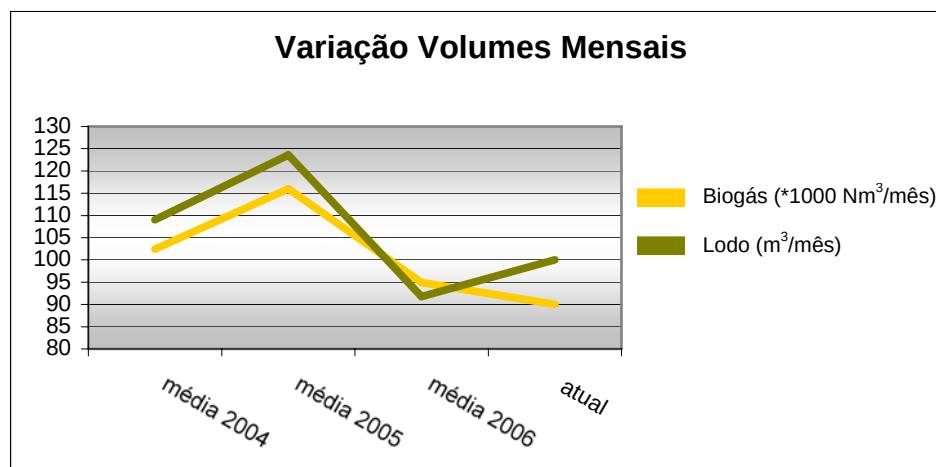


Figura 04 – Variação dos volumes mensais de biogás e lodo.

Pode-se verificar pelas figuras (02) e (04) que existe uma variação na geração dos subprodutos, mas os dois subprodutos são proporcionais na geração, pois quando há um aumento no volume de efluente, também há no volume de biogás e lodo.

Este trabalho sugere pequenas alterações no sistema de tratamento de efluentes para que os subprodutos sejam aproveitados. A Figura 05 mostra o fluxograma atual da empresa, no qual o biogás é queimado e o lodo é enviado para a compostagem em empresas de terceiros, gerando assim custos adicionais.

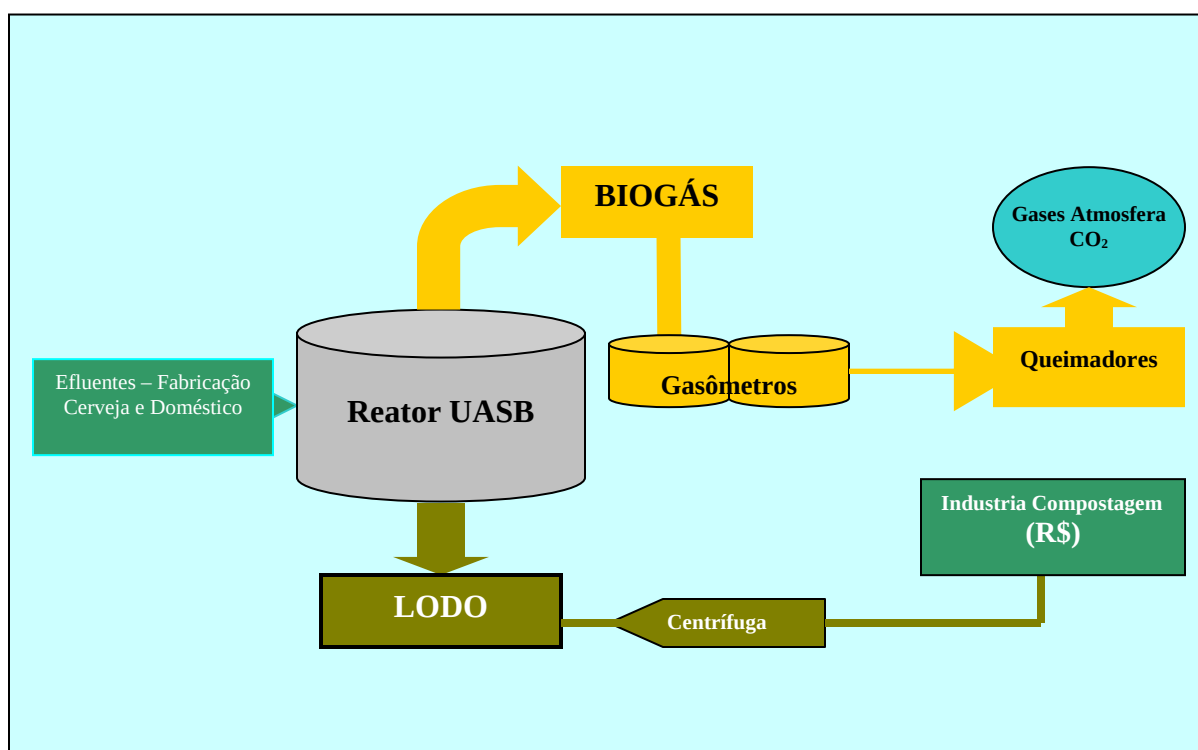


Figura 05 – Fluxograma atual do lodo e biogás.

As alterações de processo aqui sugeridas permitem melhor aproveitamento dos subprodutos conforme mostra a figura 06. O biogás é destinado para alimentar motogeradores para produzir energia elétrica. Os gases de descarga oriundos dos motogeradores disponibilizam energia térmica para a secagem do lodo. O lodo seco com volume reduzido pode ser usado como adubo orgânico na agricultura.

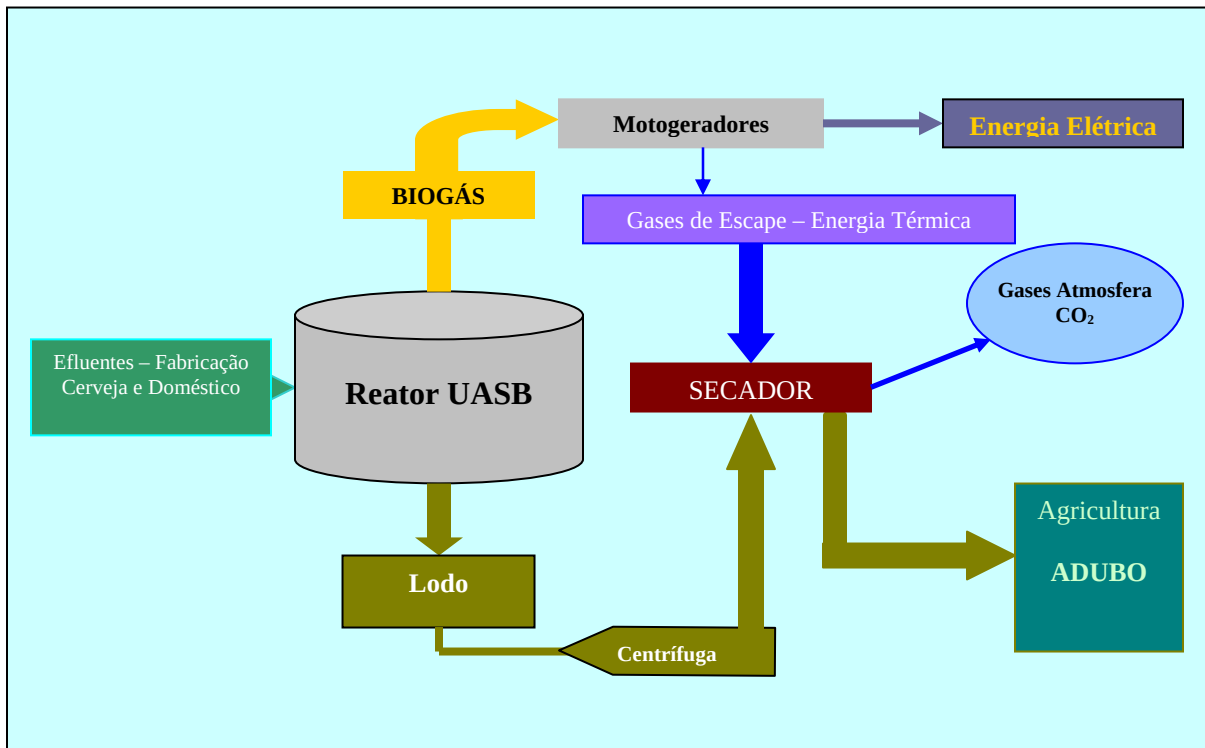


Figura 06 – Fluxograma proposto para os subprodutos.

2. REATORES ANAERÓBIOS

Os reatores anaeróbios são os mais indicados para efluentes com elevada carga orgânica, devido principalmente à simplicidade de funcionamento destes sistemas. De acordo com Neto (1994), a pesquisa sobre processos anaeróbios de tratamentos de esgotos, notadamente os reatores de manta de lodo (UASB), permitiu ao sistema maior destaque, no Brasil e no mundo. Estes sistemas são os que melhor se adaptam a regiões de clima quente. No início dos anos oitenta, reatores anaeróbios tinham seu uso incipiente quando comparado aos reatores aeróbios. O conceito de bom rendimento e fácil manutenção difundiu significativamente este tipo de reator. Entretanto, há pesquisadores cujos trabalhos trazem críticas aos processos anaeróbios de geração de gás. Segundo Grady e Lim (1980), parte das críticas advém de preconceitos ou conhecimento superficiais do processo de geração anaeróbia de gás.

2.1 Despejos Passíveis de Serem Tratados Por Via Anaeróbia

Os digestores anaeróbios tornam-se mais eficientes quando os dejetos são facilmente biodegradáveis. Em geral, estes biodigestores são aplicados para o tratamento de resíduos sólidos, incluindo culturas agrícolas, dejetos de animais, lodos de estação de tratamento de esgotos e lixo urbano. A digestão anaeróbia é também aplicada para o tratamento de efluentes de indústrias agrícolas, alimentícias e de bebidas, entre elas citam-se: abatedouros, frigoríficos, produção de açúcar e 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 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), através dos reatores tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). Entretanto, esta tecnologia que depende da proliferação de bactérias anaeróbias é sensível a variações da temperatura, variações de matéria prima e não se consegue produtividade para valores de temperatura abaixo de 20°C. Os processos em que se usam partes do gás gerado para aquecer a matéria prima não podem ser aplicados para o esgoto doméstico por ser este muito diluído e produzir pouco gás.

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, México, Colômbia, 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 03.

Tabela 03 – Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.

Vantagens	Desvantagens
- Baixa produção de sólidos, cerca de cinco a dez vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios;	- As bactérias são susceptíveis à inibição por um grande número de compostos;
- Baixo consumo de energia, usualmente associada a uma elevatória de chegada. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos;	- A partida do processo pode ser lenta na ausência de lodo de semeadura adaptado;
- Baixa demanda de área;	- 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;	- Possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis;
- Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários 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 Chernicharo e Campos (1995); Von Sperling (1995), Lettinga *et al.* (1996).

Nos sistemas aeróbios, ocorre somente cerca de 30 a 50% de degradação biológica, com conseqüente conversão em CO₂. Uma enorme incorporação de matéria orgânica como biomassa microbiana (cerca de 45 a 60%) é verificada, 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 55 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 (5 a 30%).

Na figura 07, verifica-se 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).

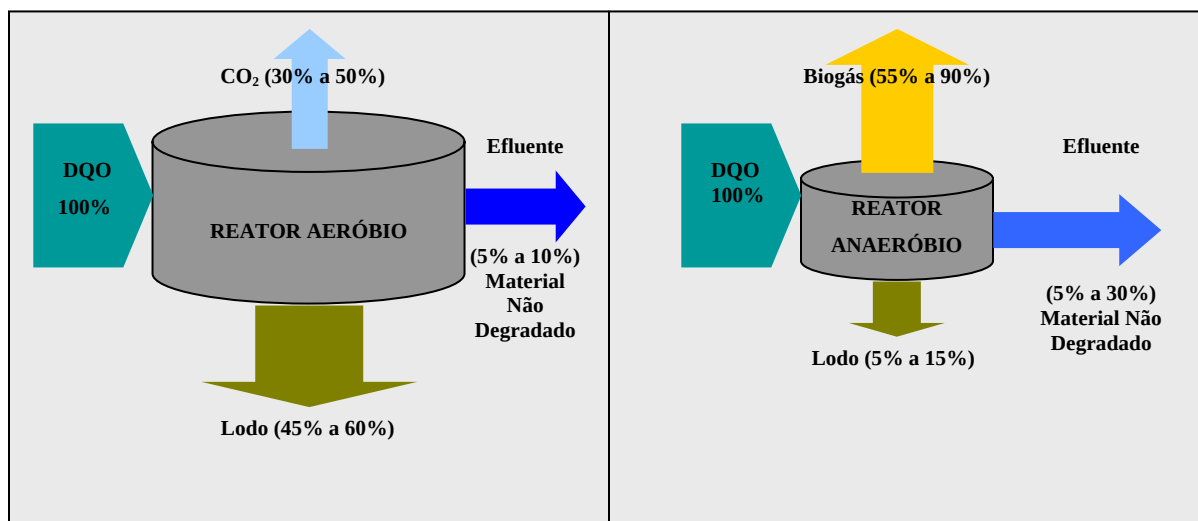


Figura 07 – Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios

Fonte: Adaptado de 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. Barros *et al.*, (1995),

lembram que 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. Neste sentido a digestão anaeróbica apresenta-se como alternativa integrada de tratamento de esgotos e de recuperação de subprodutos, conforme ilustrado na figura 08.

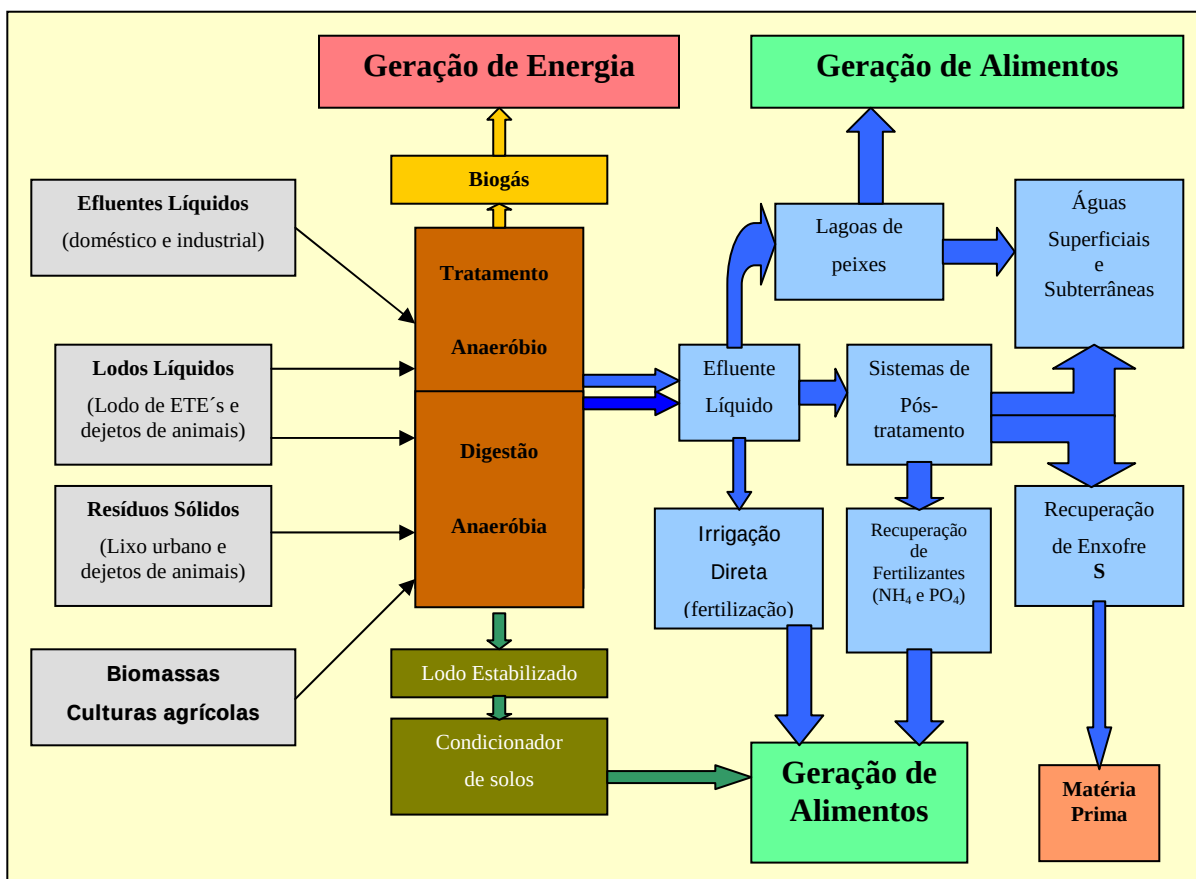


Figura 08 – Digestão anaeróbica como tecnologia de integrada de tratamento de esgotos e de recuperação de subprodutos.

Fonte: Adaptado de Lettinga, 1995.

2.3 Fundamentos da Digestão Anaeróbica

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 se encontram prontamente disponíveis como aceptores de elétrons. O metano é formado 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).

De acordo com Soubes (1994), a digestão anaeróbia representa um sistema ecológico 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, além de utilizarem o hidrogênio, favorecendo o ambiente para que as bactérias acidogênicas fermentem compostos orgânicos com a produção de ácido acético, o qual é convertido a metano.

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. Os 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 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), como mostrado na figura 09.

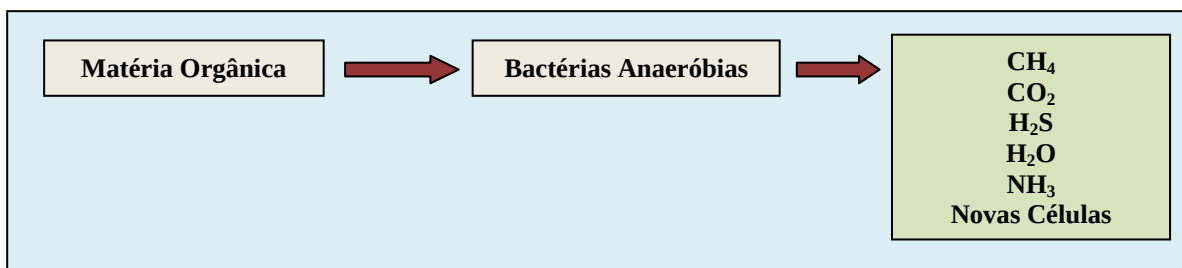


Figura 09 – Esquema simplificado da digestão anaeróbia com os compostos resultantes.

Fonte: Chernicharo, 1997.

Conforme Novaes (1986), os microrganismos que participam do processo de decomposição anaeróbia podem ser divididos em três importantes grupos de bactérias, com comportamentos fisiológicos distintos:

- Bactérias fermentativas - 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 - bactérias produtoras de hidrogênio, as quais convertem 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 constituem 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 figura 10.

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

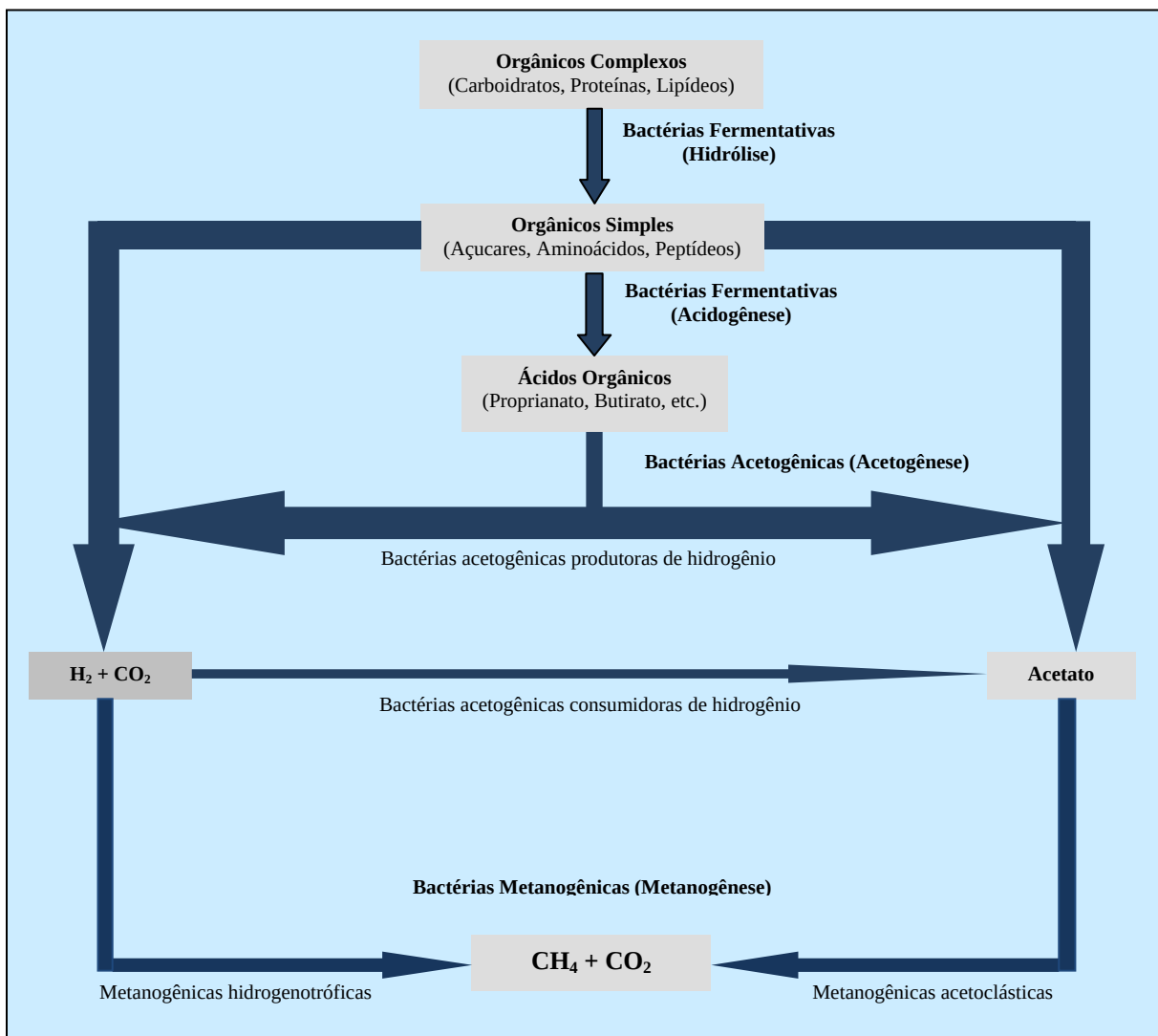


Figura 10 – Seqüências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.
Fonte: (Chernicharo, 1997).

1 - 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 NH_4^+ -N;
- Concentração de produtos da hidrólise (ex: ácidos graxos voláteis).

2 - Acidogênese: Os produtos solúveis oriundos da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, os quais são então excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos voláteis, alcoóis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. Como os ácidos graxos voláteis são os principais produtos 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 tratos digestivos, participando da degradação de açúcares e aminoácidos. A maioria das bactérias acidogênicas é anaeróbia estrita, mas cerca de 1% consiste de bactérias facultativas que podem oxidar o substrato orgânico por via oxidativa. Isso é particularmente importante, uma vez que as bactérias anaeróbias estritas são protegidas contra a exposição ao oxigênio eventualmente presente no meio (van Haandel e Lettinga, 1994).

3 - Acetogênese: São as bactérias acetogênicas as 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.

4 - Metanogênese: Segundo Orenland e Polcin (1982), a etapa final no processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono é efetuada pelas bactérias metanogênicas. 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. Desenvolve-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 (Soube, 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 *Methanobrevibacter*.

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 o abaixamento da pressão parcial de hidrogênio no meio, tornando possível as reações de produção das bactérias acidogênicas e acetogênicas.

De acordo com Visser (1995), 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 (redução de sulfato e formação de sulfetos). 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*.

De acordo com Orelan (1982), na ausência de sulfato, o processo de digestão anaeróbia ocorre de acordo com a figura 11. Com a presença de sulfato numa água residuária, muitos compostos intermediários, formados através das rotas identificadas na figura 10, passam a ser utilizados pelas bactérias sulforedutoras, provocando uma alteração nas rotas metabólicas no digestor anaeróbio conforme mostrado na figura 11. 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

De acordo com Chernicharo (1997), 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).

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, propriônico, butírico e, em menor quantidade o valérico e o isovalérico.

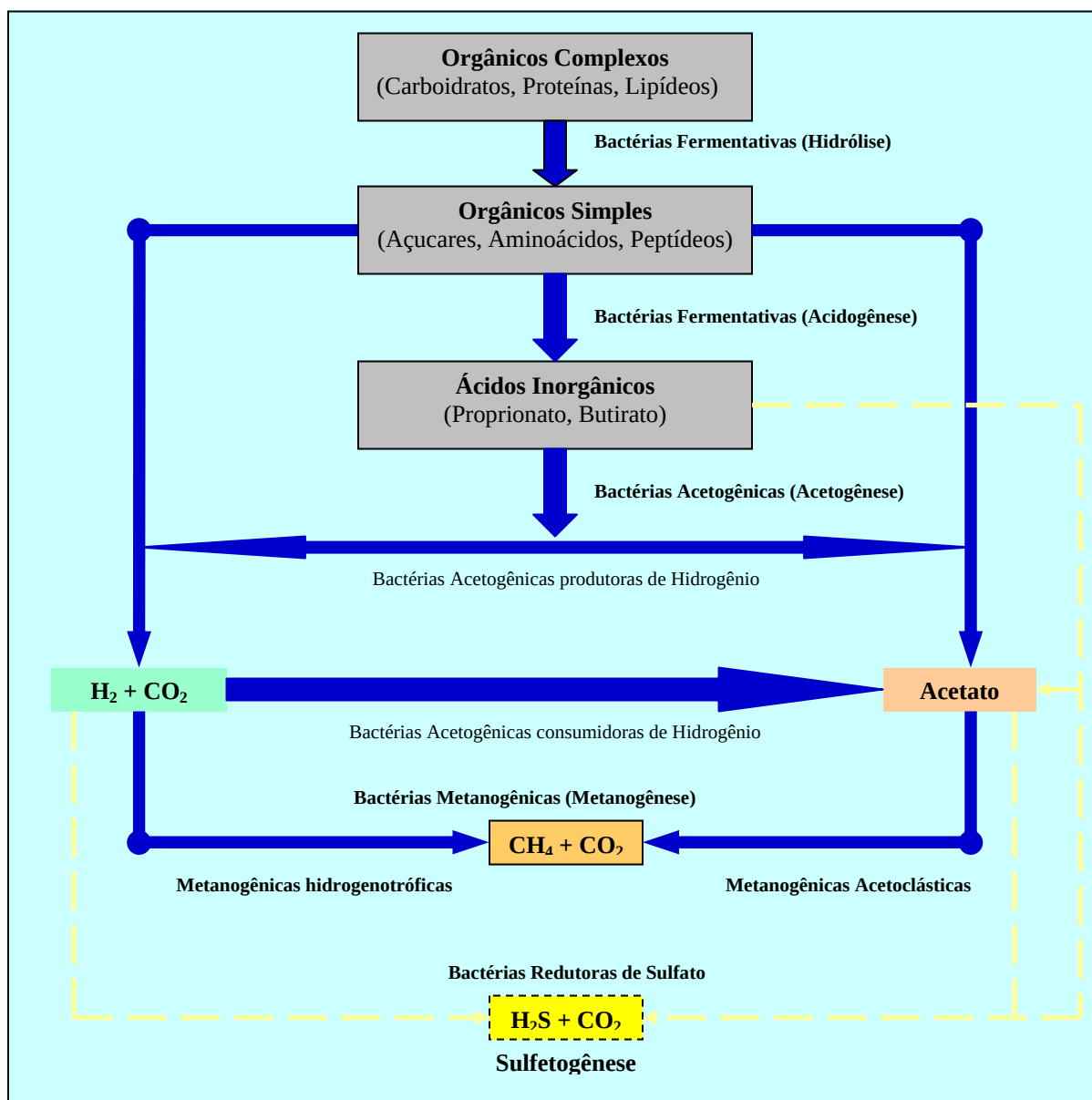


Figura 11 – Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia, com redução de sulfato.

Fonte: Chernicharo, 1997.

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.

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, de acordo com Lettinga (1995), é normalmente referenciada como Reator Azedo. 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.

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 figura 12. 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.

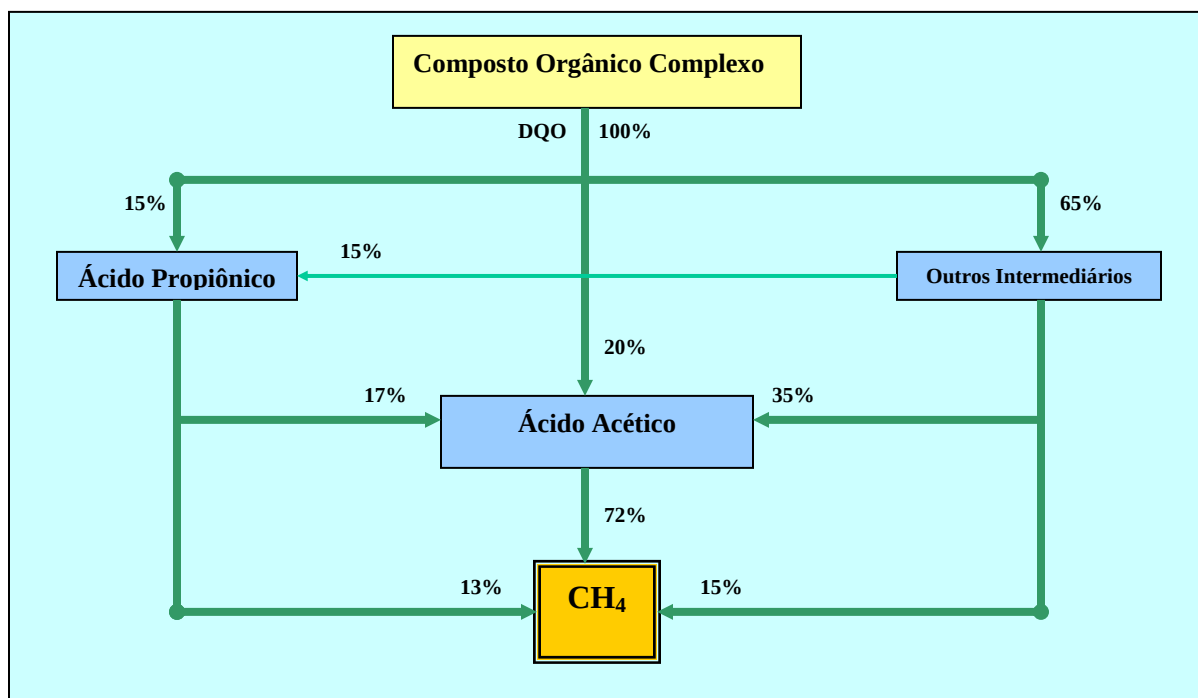


Figura 12 – Rotas de Formação de Metano a partir da fermentação de substratos complexos

Fontes: Adaptado de Chernicharo, 1997, e McCarty, 1964.

2.3.4 Aspectos Termodinâmicos

De acordo com Chernicharo (1997), algumas das reações de conversão dos produtos das bactérias fermentativas em acetato e dióxido de carbono são ilustradas na tabela 04. A última coluna do quadro fornece a variação de energia livre padrão (pH igual a sete e pressão de uma atm), considerando a temperatura de 25°C e o líquido como sendo água pura. Todos os compostos presentes na solução apresentam uma atividade de um mol/kg.

De acordo com os exemplos apresentados na tabela 04 é possível notar que o propionato, o butirato e o etanol (reações um, dois e três) 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 cinco, seis e sete da tabela 04.

Tabela 04 – Algumas reações de oxiredução importantes na digestão anaeróbia.

Nº	Reações de Oxidação (doadoras de elétrons)		ΔG_0 (kJ/mol)
1	Propionato $\Rightarrow$ Acetato	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \Rightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 3H_2$	+ 76,1
2	Butirato $\Rightarrow$ Acetato	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2H_2O \Rightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	+ 48,1
3	Etanol $\Rightarrow$ Acetato	$CH_3CH_2OH + H_2O \Rightarrow CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	+ 9,6
4	Lactato $\Rightarrow$ Acetato	$CH_3CHOHCOO^- + 2H_2O \Rightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2$	-4,2
Nº	Reações de Redução (acceptoras de elétrons)		ΔG_0 (kJ/mol)
5	Bicarbonato $\Rightarrow$ Acetato	$2HCO_3^- + 4H_2 + H^+ \Rightarrow CH_3COO^- + 4H_2O$	- 104,6
6	Bicarbonato $\Rightarrow$ Metano	$HCO_3^- + 4H_2 + H^+ \Rightarrow CH_4 + 3H_2O$	-135,6
7	Sulfato $\Rightarrow$ Sulfeto	$SO_4^{2-} + 4H_2 + H^+ \Rightarrow HS^- + 4H_2O$	-151,9

Fonte: Foresti (1994), Lettinga *et al* (1996).

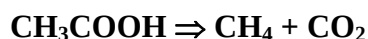
Num digestor metanogênico, operando de forma apropriada a pressão parcial de H_2 não excede a 10^{-4} atm. Nestas condições de baixa pressão parcial de hidrogênio, passa a ocorrer então a degradação de propionato, butirato e etanol, liberando energia livre para o meio. Estas baixas pressões parciais 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

De acordo com Chernicharo, (1997), 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.

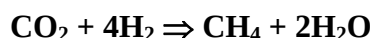
Existem dois mecanismos básicos de formação do metano: 1) pela clivagem do ácido acético; e 2) pela redução do gás carbônico.

- 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 aceptor 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 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).

3. 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 esgoto 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 o desenvolvimento de uma biomassa de elevada atividade. Esta biomassa pode se apresentar na forma de flocos ou grânulos (um a cinco mm de tamanho). O cultivo de um lodo anaeróbico 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 100 gST/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.

Conforme Lettinga et al (1984), o segundo princípio fundamental do processo é a presença de um dispositivo de separação de gases e sólidos, localizado na parte superior do reator. O principal objetivo deste dispositivo é a separação dos gases contidos na mistura líquida, de tal forma que a zona propícia à sedimentação seja criada no extremo superior do reator.

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. 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. (Chernicharo, 1997). A figura 13 ilustra diferentes formas do reator UASB.

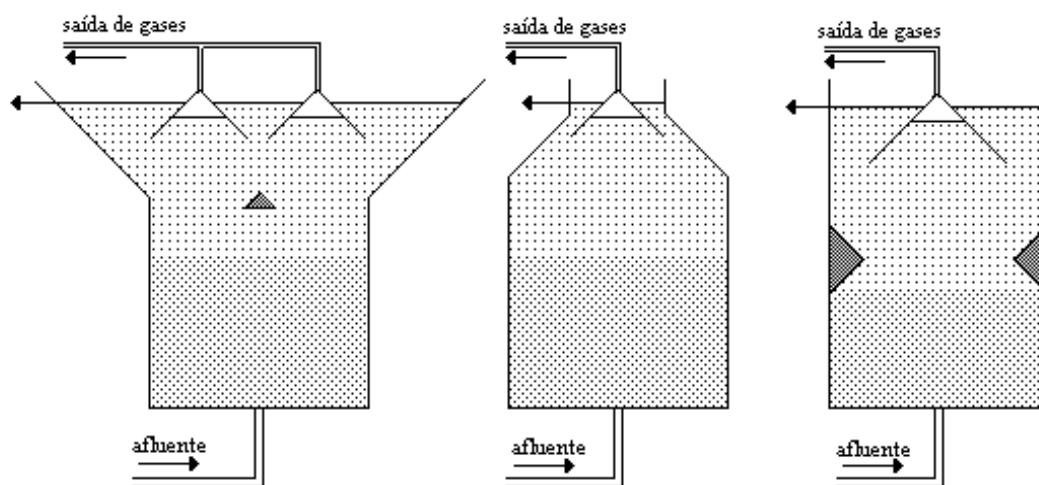


Figura 13 – Esquemas de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo.

Fonte: Fernandes, 2007.

3.1 Princípios do Processo

De acordo com Campos e Dias (1989), o processo de tratamento anaeróbio de efluentes com reatores que possuem manta de lodo, procede-se inicialmente com a introdução no reator de quantidades suficientes de lodo anaeróbio, iniciando-se em seguida a sua alimentação em baixa taxa no modo ascendente. Este período inicial é conhecido 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 a 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 a 100 gST/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 um a cinco 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 decréscimo 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 de um e meio a três por cento. O sistema é automisturado 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 carreamento 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.

De acordo com Chernicharo, (1997), 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. A figura 14 mostra o funcionamento de um reator UASB.

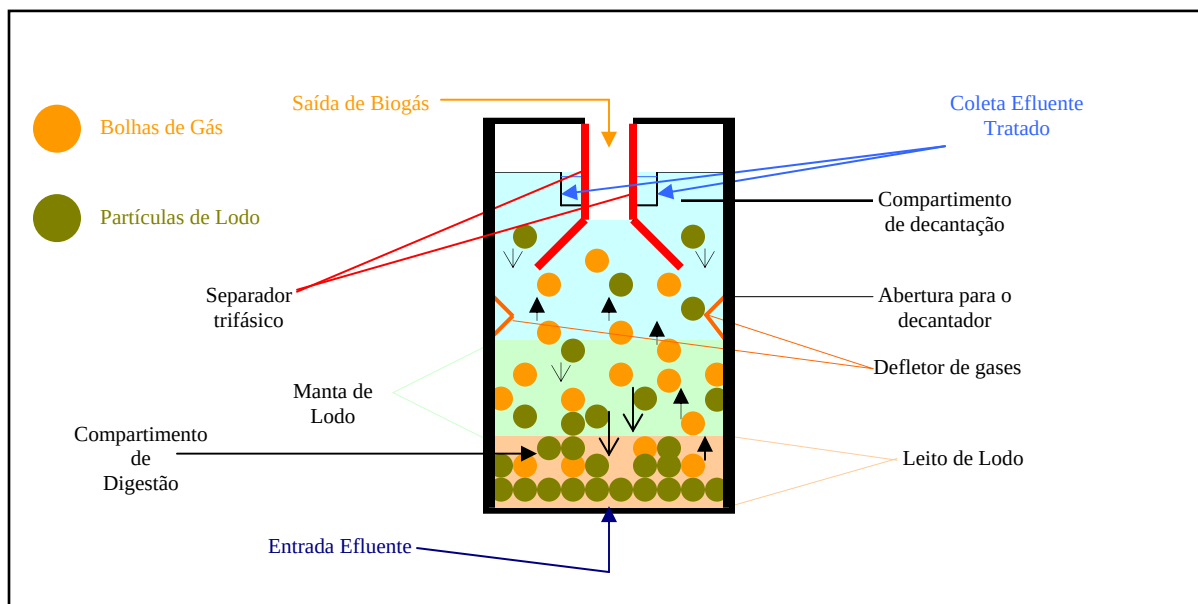


Figura 14 – Desenho esquemático do reator anaeróbico UASB.

Fonte: Adaptado de Chernicharo, 1997.

De acordo com Campos et al (1986), 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. São os seguintes princípios mais importantes que governam a operação de um reator de manta de lodo:

- As características do fluxo ascendente devem assegurar o máximo contato entre a biomassa e o substrato;
- Os curtos-circuitos devem ser evitados, de forma a garantir tempo suficiente para a degradação da matéria orgânica;
- 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 ultimo (separador trifásico);
- 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. A agregação microbiana ou “granulação” é um fenômeno

que ocorre em processos anaeróbios de tratamento de águas residuais industriais (Hulshoff Pol *et al*,1983). Os grânulos são densas estruturas de biomassa anaeróbia com uma atividade metanogênica específica elevada que se formam nos reatores anaeróbios.

4. LODO - BIOSSÓLIDO

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 bio sólido, conforme Andreoli *et al*. (2001), o termo deve ser utilizado, somente, se as características químicas e biológicas do lodo forem compatíveis com uma forma produtiva de utilização, como, por exemplo, na agricultura. O termo “bio sólido” é uma forma de ressaltar os aspectos benéficos do lodo, 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.

De acordo com Von Sperling (1996), 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. 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).

Conforme abordado por Gonçalves (1998), as exigências da sociedade e das agências ambientais por melhores padrões de qualidade ambiental têm se refletido nos gestores de públicos ou privados dos serviços de saneamento. 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 mostram que a gestão de bio sólidos é um problema crescente no Brasil, com uma tendência de um rápido agravamento nos próximos anos.

4.1 Produção de Lodo nos Sistemas de Tratamento de Esgotos

De acordo com Aisse et al (1999), 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.

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 específica 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 efluente. 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 seja 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, para dar um polimento a qualidade do efluente secundário, há também produção de lodo misto (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). Conforme Luduvic (1992), o lodo biológico descartado também é denominado lodo excedente.

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, formação do lodo. 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) e anaeróbios. A seguir é apresentada uma descrição resumida dos principais tipos de subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgotos, são eles de acordo com 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** – originada 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, sabão, 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 espuma. No tratamento secundário, os reatores biológicos também produzem espuma, contando em sua composição com a presença de bactérias que se desenvolvem em condições ambientais específicas. Esta espuma 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 biodisco). O lodo biológico excedente (lodo secundário) compreende a biomassa de microrganismos aeróbios gerada à custa 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 emissão 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 à custa 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), portanto, maior teor de sólidos inorgânicos. Este lodo não requer uma etapa de digestão posterior;

- **Lodo Biológico Anaeróbico (estabilizado)** – originário 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 à custa 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.

4.2 Processamento do Lodo

O lodo de esgoto, conforme abordado anteriormente, necessita, para que todo o sistema de tratamento de efluentes seja considerado adequado, da correta gestão. Na tabela 05 são mostradas as etapas de gerenciamento do lodo e seus objetivos.

Tabela 05 – Principais etapas do gerenciamento do lodo.

Etapas	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).

De acordo com Gonçalves e Passamani (2000), 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.

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, 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. De acordo com Fernandes (2000), para a incineração ou disposição do lodo em aterro, a higienização não é necessária.

Dentro de cada etapa do processo, há variantes, as quais são listadas na tabela 06, 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 06 – 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.	- Leitos 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).

4.3 Secagem Térmica do Lodo

De acordo com Gonçalves (1998), o processo de secagem térmica do lodo é uma das mais eficientes e flexíveis formas de redução do teor de umidade de “tortas” oriundas do desaguamento de lodos orgânicos domésticos e industriais disponíveis, atualmente em uso. Pode ser utilizado em diferentes tipos de lodo, primário ou digerido sendo recomendável um teor de sólidos na alimentação entre 15 e 30 % obtido através do desaguamento mecânico. A redução da umidade a ser atingida pode ser controlada e o teor de sólidos do produto final depende da rota de disposição escolhida, citando-se como exemplos:

- **Lodos destinados à incineração:** necessitam de teores de sólidos entre 30 e 35%, para garantir a operação auto-térmica do incinerador;
- **Lodos para disposição em aterros sanitários:** teor de sólidos em torno de 65%;
- **Biossólidos destinados ao mercado agrícola através de venda no varejo (utilização irrestrita):** teores de sólidos acima de 90%.

Em condições ideais são necessários 2744 kJ de energia para a evaporação de um kg de água presente no lodo. Em condições operacionais normais, este valor costuma ser acrescido em até 100%. (Von Sperling *et al*, 2001). A demanda total de energia dependerá da eficiência do equipamento escolhido e do tipo de lodo processado. Parte desta energia deverá vir de fontes externas, como óleo combustível, gás natural, etc. Para o caso de lodos anaeróbios, utiliza-se o biogás gerado no digestor como fonte auxiliar de energia. Os principais benefícios da secagem térmica do lodo são:

- Redução significativa do volume de lodo;
- Redução no custo de transporte e estocagem (quando for o caso);
- Produto estabilizado facilmente estocado, manuseado e transportado;
- Produto final praticamente livre de patógenos;
- Preservação das propriedades agrícolas do lodo;
- Não necessita de equipamento especial para ser utilizado na agricultura;
- Pode ser incinerado ou disposto em aterro sanitário;
- Produto pode ser ensacado e distribuído pelo comércio varejista.

Historicamente a secagem térmica tem sido adotada em ETEs existentes que estão sofrendo algum tipo de modernização. (Von Sperling *et al*, 2001).

5. 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 considerou que esta fermentação podia constituir uma fonte de aquecimento e iluminação”, ao apresentar à Academia das Ciências os trabalhos do seu aluno (Classen et al, 1999).

Na Índia, a idéia de aproveitar o gás metano produzido por digestão anaeróbia, existia 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 na cozinha e no aquecimento das casas e 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.

5.1 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. 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 07.

Tabela 07 – Composição média biogás

Composto	Porcentagem na Mistura Gasosa (%)
Metano (CH ₄)	50 a 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	15 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 de Thomas & Delval (1987).

O Biogás é, devido à presença do metano, um gás combustível, sendo o seu poder calorífico inferior (P.C.I.) cerca de 23000 kJ/Nm³, quando a proporção em metano é aproximadamente de 60%. A tabela 08 mostra a variação do poder calorífico do biogás em relação à composição, e a título de comparação, a tabela 09, que segue, apresenta os P.C.I.s para outros gases correntes.

Tabela 08 – Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás

Composição Química Biogás	Massa Específica (kg/Nm³)	Poder Calorífico Inferior (kJ/Nm³)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	1.938,5
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	9.790,9
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	17.710,1
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	20.227,0
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	26.180,1
95% CH ₄ , 05% CO ₂	0,7768	43.834,1
99% CH ₄ , 01% CO ₂	0,7268	48.822,4

Fonte: Avellar (2001).

Tabela 09 – Comparação PCI biogás com outros gases.

Gás	P.C.I. (kJ/Nm³)
Metano	35.587,8
Propano	92.109,6
Butano	117.230,4
Gás de Coqueria	18.421,9
Gás de Cidade	16.747,2
Gás Natural	35.813,9
BIOMETANO (Biogás)	23.027,4

Fonte: Adaptado de Alves (2000) e Thomas & Delval (1987)

O biogás é um gás leve e de baixa densidade. Mais leve do que o ar, contrariamente ao butano e ao propano, ele representa 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, 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

manufaturado 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 (SO_2) é extremamente nociva, 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 tabela 10 mostra a equivalência energética entre o biogás e outros combustíveis utilizados no dia a dia.

Tabela 10 – Equivalência energética biogás

1 m³ de biogás = 23.027,4 kJ, é equivalente a:	
0,7 m³ de metano	0,25 m³ de propano
0,8 l de gasolina	1,3 l de álcool
1,4 kg de carvão de madeira	0,7 l de gasóleo
0,2 m³ de butano	2,7 kg de madeira

Fonte: Adaptado de Thomas & Delval (1987).

5.2 Utilização do Biogás em Motores

O biogás pode ser utilizado nas condições em que é gerado, e dependendo da aplicação, pode ser necessária a redução da concentração de H_2S , CO_2 , redução da umidade ou mesmo a elevação da pressão (Costa, 2006). O uso do biogás em motores exige que a redução na concentração de compostos, redução de umidade e principalmente elevação da pressão.

Conforme Costa (2006), a relação entre massa e volume de metano (CH_4) puro é de $0,6 \text{ kg/Nm}^3$. Energeticamente o biogás purificado corresponde ao Gás Natural Combustível (GNC), sendo que seu poder calorífico é menor, quanto maiores forem as proporções de contaminantes na mistura que o compõe. Em média o poder calorífico é igual a 20900 kJ/Nm^3 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. 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 motores.

5.3 Biogás da Indústria Cervejeira

De acordo com Etheridge (2003), o Biogás gerado pela indústria cervejeira possui como valor mais conservativo o poder calorífico inferior na ordem de 20 MJ/Nm^3 , considerando assim que possui cerca de 60% de metano na composição total do gás.

Para a verificação, foi analisado o Biogás da indústria em um Cromatógrafo a Gás da marca Finningam. Para a análise o aparelho utiliza os gases nitrogênio, oxigênio e ar sintético no processo, a figura 15 demonstra o equipamento utilizado para as análises nas amostras de biogás. Cinco amostras de cada reator foram retiradas na saída dos respectivos gasômetros a uma temperatura ambiente de $22,2^\circ\text{C}$. Somente três amostras foram de cada reator foram validadas, perfazendo um total de seis amostras do biogás gerado pela cervejeira. A tabela 11 mostra os resultados das análises e a tabela 12 a média obtida em cada reator.

Tabela 11 – Resultado Análise do Biogás

Reator	Amostra	Horário Coleta	Parâmetro Analisado	Resultado (% em massa)
1	1	08:08 h	Dióxido de Carbono (CO ₂)	15,715
			Oxigênio (O ₂)	0,03
			Nitrogênio (N ₂)	0,619
			Metano (CH₄)	83,636
1	2	08:13 h	Dióxido de Carbono (CO ₂)	15,411
			Oxigênio (O ₂)	0,029
			Nitrogênio (N ₂)	0,615
			Metano (CH₄)	83,945
1	4	08:19 h	Dióxido de Carbono (CO ₂)	15,473
			Oxigênio (O ₂)	0,018
			Nitrogênio (N ₂)	0,439
			Metano (CH₄)	84,07
2	1	08:38 h	Dióxido de Carbono (CO ₂)	14,804
			Oxigênio (O ₂)	0,024
			Nitrogênio (N ₂)	0,575
			Metano (CH₄)	84,597
2	2	08:40 h	Dióxido de Carbono (CO ₂)	14,956
			Oxigênio (O ₂)	0,029
			Nitrogênio (N ₂)	0,638
			Metano (CH₄)	84,377
2	3	08:43h	Dióxido de Carbono (CO ₂)	14,885
			Oxigênio (O ₂)	0,029
			Nitrogênio (N ₂)	0,628
			Metano (CH₄)	84,458

Fonte: Análises realizadas pelo autor.

Tabela 12 – Média das análises nos reatores um e dois.

Reator	Parâmetro Analisado	Resultado (% em massa)
1	Dióxido de Carbono (CO ₂)	15,533
	Oxigênio (O ₂)	0,267
	Nitrogênio (N ₂)	0,558
	Metano (CH₄)	83,883
2	Dióxido de Carbono (CO ₂)	14,882
	Oxigênio (O ₂)	0,027
	Nitrogênio (N ₂)	0,614
	Metano (CH₄)	84,477
Média Reatores 1 e 2.	Dióxido de Carbono (CO ₂)	15,207
	Oxigênio (O ₂)	0,026
	Nitrogênio (N ₂)	0,586
	Metano (CH₄)	84,18

Fonte: Análises realizadas pelo autor.

**Figura 15** – Cromatógrafo a gás utilizado nas análises de biogás.

Fonte: Imagem feita pelo autor no local de análise, 23/10/2007.

6. BIOSSÓLIDO NA AGRICULTURA

Das diversas alternativas para a disposição final de lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes, o uso agrícola se destaca por sua economia e adequação ambiental, se observados determinados critérios ambientais e sanitários. Para garantir a segurança, a reciclagem do lodo só é recomendada quando existe um controle eficiente sobre a sua estabilidade e seu conteúdo de contaminantes biológicos e químicos. A estabilidade e o conteúdo de agentes patogênicos são mais fáceis de controlar, porque são características do sistema de tratamento dos esgotos ou de operações específicas no lodo, tais como sistemas de estabilização e higienização, dependendo, portanto, somente da concessionária (Santos, 1996).

Os contaminantes químicos e os micropoluentes orgânicos exigem um gerenciamento eficiente no controle do recebimento de efluentes industriais na rede coletora pública. Para garantir a segurança ambiental e sanitária, o gerenciamento do destino dos bio sólidos deve ser apoiado em um programa de monitoramento de sua qualidade. O programa, um dos principais objetivos das normas que regulamentam a disposição final, deve estabelecer quais contaminantes serão pesquisados, quais níveis serão tolerados, com que frequência o bio sólido será examinado e quais alternativas para a disposição são permitidas em função da qualidade obtida (Adreolli, *et al*, 1997). Para seu uso útil na agricultura, além de oferecer um produto de boa qualidade, as normatizações devem estabelecer os critérios de utilização agrônômica visando à adequação ambiental de áreas de aplicação, das culturas que serão exploradas e que permitam uma boa rentabilidade aos produtores rurais, garantindo a sustentabilidade da alternativa através do tempo.

6.1 Normatizações

As normas para o uso agrícola dos bio sólidos nos Estados Unidos, na Comunidade Européia e as já disponíveis no Brasil referem-se unanimemente a concentrações em miligramas de poluente por quilograma de sólidos em base seca. Conforme Cunha e Neto (2000), a comunidade econômica européia (CEE) e os EUA possuem leis que disciplinam o uso dos bio sólidos das estações de tratamento de esgotos sanitários na agricultura. No Brasil, o estado de São Paulo possui norma promulgada pela Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental – CETESB, desde quatro de dezembro de 1999. A cidade de Franca-SP

fundamentou-se na norma CETESB para elaborar seu próprio manual para os bio sólidos produzidos na ETE da SABESP, registrando-o como condicionador de solos no Ministério da Agricultura, sob fiscalização, faz aplicação em culturas de milho, café e reflorestamentos. O Paraná tem uma proposta de normatização sendo examinada pelo IAP – Instituto Ambiental do Paraná. O bio sólido das estações de Brasília é utilizado para a recuperação de áreas degradadas e para diversos usos agrícolas, sob recomendações de um texto explicativo de suas propriedades e de como deve ser manejado e aplicado.

A atual regulamentação norte-americana para o uso ou disposição dos bio sólidos derivados do esgoto sanitário serviu como primeira referência para São Paulo. Trata-se da 40 CFR Part 503 (código de regulamentos federais nº 40, seção 503), promulgada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA). Foram também consultadas, conforme Santos (1996), as normas do DEHNR – North Carolina Department of Environment, Health and Natural Resources – agência ambiental do Estado da Carolina do Norte e do DHEC Department of Health and Environmental Control – agência ambiental do Estado da Carolina do Sul.

Tanto na CEE como nos Estados Unidos é consensual limitar o uso agrícola conforme as concentrações de um pequeno número de metais pesados: cádmio, chumbo, cobre, mercúrio, níquel e zinco. Outros metais e contaminantes têm merecido um espaço próprio de discussões. Os EUA controlam, além daquela relação básica, o arsênio, o selênio e o molibdênio. O cromo era limitado na diretiva da comunidade europeia 86/278/EEC de 04/07/86 e também na versão original da “Part 503”, de 19/02/93. Posteriormente foi retirado de ambas regulamentações (da CEE pela 91/692 de 31/12/91), mas ainda é controlado no Canadá. Além daquele elenco de metais comuns, a França controla a soma das concentrações de Cr, Cu, Zn e Ni e o Canadá regulamenta o Co e Mo. Na Alemanha existem limites para os TOX (halogenados orgânicos absorvíveis), os PCB’s (bifenilas poli-clorados) e os PCDD/PCDF’s (dioxinas e furanos). Com relação à higienização dos bio sólidos, as normatizações usualmente incluem a contagem e viabilidade dos ovos de helmintos, além da presença de coliformes fecais, *Salmonella sp.* e vírus.

Nos EUA e seguidores, tais como Austrália (Lue-Hing *et al*, 1997), os limites para os poluentes nos bio sólidos são fixados sob o conceito de administrar um risco ambiental aceitável. Analisam-se a exposição e a dosagem de resposta, caracterizando o risco por uma

abordagem probabilística e pelo cálculo da concentração que causaria a primeira indicação de fitotoxicidade. Já a CEE e o Canadá baseiam-se nas concentrações de poluentes autóctones e nas que pré-existiam no solo antes da aplicação do bio sólido (EPA, 1995). O nitrogênio é um dos principais componentes benéficos do lodo, contudo pode também percolar para o lençol freático, causando problemas de contaminação, pois suas transformações no solo levam à produção de nitratos que não são retidos pelo complexo do solo. Por esta razão, muitas normatizações incluem limites de doses de aplicação de bio sólidos com base no seu teor de nitrogênio. (Furukawa, 1997).

No Brasil, os solos são predominantemente ácidos, o que implica em maior solubilidade dos metais pesados, pobres em fósforo. De acordo com Santos (1996), os constituintes químicos do lodo que necessitam de monitoramento também devem ser definidos de acordo com as condições locais.

6.1.1 Utilização de Bio sólidos no Estado de São Paulo

Em São Paulo a norma de aplicação de Lodos de Sistemas de Tratamentos Biológicos em Áreas Agrícolas – Critérios Para Projeto e Operação (Manual Técnico) é a Norma Técnica P-4.230, homologada pela Diretoria Plena da CETESB em 21/10/99, conforme ementa de normas técnicas publicada no Diário Oficial de 04/12/99 (CETESB, 1999). Esta norma estabelece os procedimentos, critérios e requisitos para a elaboração de projetos, implantação e operação de sistemas de aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico de despejos líquidos sanitários ou industriais em áreas agrícolas visando ao atendimento de exigências ambientais (CETESB, 1999).

A norma CETESB ainda relaciona os processos de tratamentos aceitos para redução de patógenos nos bio sólidos e os limites de aceitação para o uso agrícola. São os seguintes, conforme o Anexo B da Norma P-4.230 (1999) e USEPA, 40 CFR Part 503 Appendix B (1993), para a produção de bio sólido classe B (processos de redução significativa de patógenos - PSRP):

- Digestão aeróbia a ar ou oxigênio, com retenções mínimas de 40 dias a 20°C ou por 60 dias a 15°C;

- Secagem em leitos de areia ou em bacias, pavimentadas ou não, durante um período mínimo de três meses;
- Digestão anaeróbia por um período mínimo de 15 dias entre 35°C e 55°C ou de 60 dias a 20°C;
- Compostagem confinada, ou pela pilha estática aerada, ou pelo método de revolvimento das leiras, desde que, a biomassa atinja uma temperatura de 40°C, durante pelo menos cinco dias, com a ocorrência de um pico de 55°C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período;
- Estabilização com cal, mediante adição de quantidade suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12, por um período mínimo de duas horas.

A CETESB ainda ressalta que outros métodos poderão ser propostos, desde que haja comprovação de sua eficiência pelo acompanhamento do processo conforme expresso na norma. De forma semelhante os seguintes processos são aceitos pela CETESB, também em conformidade com a norma norte-americana, para a produção de biossólido classe A (processos de redução adicional de patógenos - PFRP):

- Compostagem confinada ou pela pilha estática aerada mantendo-se no mínimo 55°C durante três dias, ou com o revolvimento das leiras, mantendo-se no mínimo 55°C durante 15 dias, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos cinco dias ao longo dos 15 do processo;
- Secagem térmica direta ou indireta para reduzir a umidade do lodo a 10% ou menos, devendo a temperatura das partículas de lodo superar a 80°C ou a temperatura de bulbo úmido do gás, em contato com o lodo no momento da descarga do secador, ser superior a 80°C;
- Tratamento térmico pelo aquecimento do lodo líquido a 180°C, no mínimo, durante um período de 30 minutos;
- Digestão aeróbia termofílica a ar ou oxigênio, com tempos de residência de 10 dias a temperaturas de 55 a 60°C;
- Processos de irradiação de raios beta a dosagens mínimas de um megarad a 20°C, ou com raios gama a mesma intensidade e temperatura, a partir de isótopos de Cobalto 60 ou Césio 137;

- Processos de pasteurização pela manutenção do lodo a uma temperatura mínima de 70°C, por um período de pelo menos 30 minutos.

7. SECAGEM DO LODO COM O BIOGÁS GERADO PELO REATOR

Os dados obtidos na indústria cervejeira analisada mostram que atualmente o volume de biogás é equivalente a 90.000 m³ por mês. Hoje em dia o volume total do gás é enviado a queimadores, conforme ilustrado pela figura 16, não sendo aproveitado o potencial energético desse biogás.



Figura 16 – Imagens dos queimadores alimentados com o biogás.

Fonte: Imagens feitas pelo autor na ETE da Indústria Cervejeira, 11/12/2007.

A geração do biogás acontece em um Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente em Manta de Lodo (UASB). Além de gerar o biogás o tratamento anaeróbio gera o lodo. Atualmente na cervejaria é gerado em média o volume de 85 t/mês. O lodo é enviado para as centrífugas que o deságua até o teor de umidade ficar em 78%. (FEMSA, 2007). A figura 17 mostra a centrífuga utilizada para o desaguamento e na figura 18 a imagem do lodo após o desaguamento.

Com os dados iniciais fornecidos pela empresa e com o levantamento de informações relevantes ao processo de secagem do lodo com a utilização do biogás conforme artigos aqui referenciados, a viabilidade do estudo no caso da indústria foi verificada a partir do cálculo da energia necessária para que se consiga desaguar o lodo.



Figura 17 – Centrífuga utilizada para o desaguamento.

Fonte: Imagem feita pelo autor na ETE da Indústria Cervejeira, 11/12/2007.



Figura 18 – Lodo após o desaguamento.

Fonte: Imagem feita pelo autor na ETE da Indústria Cervejeira, 11/12/2007.

O valor médio do fluxo de massa do lodo atualmente é 85 t/mês o que corresponde a 2833 kg/dia ou ainda 118 kg/h a ser tratado. Em natura esse fluxo de massa contém cerca de 95% de água, ou seja,

$$\dot{m} = \dot{m}_s + \dot{m}_a \quad (1)$$

Sendo:

$\dot{m}$ - fluxo de massa total do lodo

$\dot{m}_s$ - fluxo de massa sólida contida no lodo

$\dot{m}_a$ - fluxo de massa de água contida no lodo

$$\dot{m}_s = 5,9 \text{ kg / h}$$

$$\dot{m}_a = 112,1 \text{ kg / h}$$

A massa d'água contida no lodo após passar pela centrífuga é da ordem de 78% da massa total, assim,

$$\dot{m} = 5,9 + 0,78 \cdot \dot{m} \quad (2)$$

$$\dot{m} = 5,9 + 0,78 \cdot \dot{m} \quad (3)$$

$$\dot{m} = 26,82 \text{ kg / h}$$

$$\dot{m}_a = 20,92 \text{ kg / h}$$

Portanto a massa de lodo a ser seca pelo trocador de calor é 26,82 kg/h. Desta massa total, 5,90 kg/h corresponde à parte sólida e os outros 20,92 kg/h a massa de água contida no lodo na entrada do secador. O rendimento desejado no secador resultará em um material que possua um teor de sólidos de 92%, sendo que a água contida no lodo não deverá ser maior que 8% da massa de lodo seco, visando a sua utilização na agricultura. Assim sendo o volume de massa que passara pelo secador é:

$$\dot{m} = \dot{m}_s + \dot{m}_a \quad (4)$$

Sendo:

$$\dot{m}_s = 5,90 \text{ kg/h};$$

$$\dot{m} = 5,90 + 0,08 \cdot \dot{m} \quad (5)$$

$$\dot{m} = 6,41 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_s = 5,90 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_a = 0,51 \text{ kg/h}$$

A massa total a ser processada no secador é 6,41 kg/h, mas a massa de sólidos não irá variar, pois a secagem visa a parte líquida que será evaporada com a energia fornecida ao secador, portanto, para efeito de cálculo a massa a ser vaporizada do lodo será:

$$\dot{m}_{as} = 20,41 \text{ kg/h}$$

Com a diminuição do teor de umidade ao passar pelas centrífugas para 78% e com a intenção de conseguir obter um produto final após secagem com o teor de umidade por volta de 8%, a massa de água a ser vaporizada no secador é 0,0057 kg/s (20,41 kg/h). A potencia necessária para atender a secagem prevista é, considerando, que a entalpia de vaporização da água contida no lodo, segundo Von Sperling et al (2001), é da ordem de 2744 kJ/kg.

$$\dot{W}_v = \dot{m}_v \cdot h_{lv} \quad (6)$$

$$\dot{W}_v = 15,56 \text{ kW}$$

Para o biogás que é gerado na estação de tratamento foi estimada a quantidade de energia possível de se conseguir pela reação de oxidação, e para isso foi considerado que o biogás proveniente da indústria cervejeira tenha um poder calorífico inferior (PCI) da ordem de 20 MJ/Nm³ (Etheridge, 2003).

Como no caso do lodo utilizou-se o valor gerado atualmente na cervejeira, o volume de biogás utilizado para os cálculos também será o valor atual, para que se mantenha a relação de geração de lodo e biogás da estação de tratamento de efluentes. Atualmente são produzidos 120,97 Nm³/h, portanto, A potência química disponível no biogás gerado é:

$$\dot{W}_q = \dot{V}_{bg} \cdot PCI_{bg} \quad (7)$$

$$\dot{W}_q = 988,89 \text{ kW}$$

A queima direta do gás para secar o lodo é viável de acordo com a quantia necessária de energia calculada acima, mas em tempos de escassez de energia e com um grande volume de gás para queimar é importante destacar que pode haver um uso mais nobre para a disponibilidade de energia. Com isso, a intenção é que o biogás use a sua energia para prover motogeradores, e com o gás resultante da queima que sai pelo escapamento o lodo será secado em um trocador de calor. O modelo de motogerador utilizado para queima gera uma potência de 15 kW de energia com um consumo de 7,5 Nm³/h (dado –TRIGÁS Brasil). O modelo de motogerador proposto é mostrado na figura 19. Sabendo-se que o volume gerado na ETE, de 120,97 Nm³/h de biogás, é possível colocar para trabalhar um grupo composto por 16 motogeradores com uma potência de 240 kW.



TRIERNET
PARCEIRO DO MEIO AMBIENTE

ECONOMIZADOR DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO USO DO BIOGÁS

- Quadro comando manual.
- Horímetro.
- Voltímetro.
- Amperímetro.
- Chave de partida.
- Lâmpada alternador.
- Lâmpada do óleo lubrificante.
- Proteção contra superaquecimento por falha no sistema de refrigeração.

OPCIONAIS:

- Quadro comando automático (sob consulta).
- Silencioso especial.
- Carenagem de proteção.
- Bateria de 150A 12V.
- Trocador calor sistema refrigeração.
- Mufla para aproveitamento do calor dos gases do escapamento.

Vantagens:

- Não causa curto circuito.
- Não precisa ser superdimensionado.
- Menor custo benefício.
- Maior facilidade de instalação.
- Melhora a qualidade da energia local.

TRIGÁS

ECONOMIZADOR DE ENERGIA ELÉTRICA-TRIERNET

Especificações Técnicas

ECONOMIZADOR ASSÍNCRONO

Modelo	TT 11	TT 15	TT 20	TT 30
Potência	11KW	15KW	20KW	30KW
Tensão	127/220/380/440			
Fase	Trifásico			
Sistema de Partida	Manual/Automático			
Acoplamento	Monobloco			
Bateria	12-60A			
MOTOR				
Motor	1,8	1,8	1,8	4,1
Potência	20 CV	25 CV	30 CV	45 CV
Rotação-RPM	1800	1800	1800	1800
Nº de Cilindros	4	4	4	6
Vol. Óleo Carter	3,5 litros	3,5 litros	3,5 litros	4,5 litros
Sistema de Refrigeração	Radiador / Trocador de Calor			
Combustível	GN/BIOGÁS			
Controle Rotação	Microprocessado			
Comprimento mm	1.300	1.400	1.400	2.000
Altura mm	1.000	1.000	1.000	1.200
Largura mm	750	750	750	800
Peso	200	250	250	750Kg

Outras Potências sob consulta.

Representante:



TRIGÁS
Indústria e Comércio Ltda.

Rua Itamaré, 192B - Bairro Bela Vista - 80670-100 - Curitiba do Sul - RS - Fone/Fax: (041) 218.8972 / 228.4126 - E-mail: trigas@trigas.com.br

Figura 19 – Motogerador proposto.

Fonte: Folder com especificações enviado pelo fabricante, 2005.

Para conseguir secar o lodo gerado pela estação de tratamento da indústria cervejeira com um único motogerador foi considerado que a quantidade de energia cedida pelos gases de descarga é igual à quantidade de energia recebida pelo lodo.

A potência necessária para a secagem do lodo da estação de tratamento de esgoto ($\dot{W}_s$) foi admitida como a soma da potência necessária para o aquecimento do lodo ($\dot{W}_{aq}$) com a potência necessária à evaporação da água ($\dot{W}_v$), portanto:

$$\dot{W}_s = \dot{W}_{aq} + \dot{W}_v \quad (8)$$

A potência necessária ao aquecimento da água é dada por:

$$\dot{W}_{aq} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (9)$$

O calor específico, c_p , refere-se ao lodo, e foi considerado que no caso da cervejeira o lodo é formado basicamente pela mistura de microorganismos e matéria orgânica, que na sua maior parte é formada por resíduos de cerveja, assim sendo, foi considerado o c_p da mistura mosto de cerveja e seus componentes de fabricação, o qual segundo Limoni e Veturini (1998), vale aproximadamente 3,764 kJ/kg K. A massa de lodo a ser aquecida é:

$$\dot{m} = 26,82 \text{ kg / h}$$

ΔT - corresponde à variação da temperatura do lodo desde a entrada no secador até atingir a temperatura de saturação da água para a pressão atmosférica local. Para $\Delta T = 80^\circ \text{C}$ tem-se:

$$\dot{W}_{aq} = 2,24 \text{ kW}$$

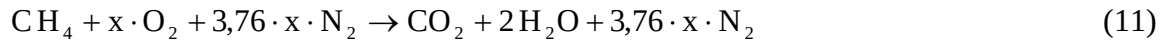
A potência necessária à secagem é:

$$\dot{W}_s = 17,80 \text{ kW}$$

A potência disponível nos gases de descarga pode se calculada pela relação:

$$\dot{m}_d = \dot{m}_{bg} + \dot{m}_{ar} \quad (10)$$

Como o biogás em geral tem composição variada, a análise deste tópico será feita para o metano (C H₄). A reação de oxidação suposta estequiométrica é dada por:



e portanto $x = 2$

A relação ar combustível em massa é:

$$RAC = \frac{m_a}{m_{bg}} \quad (12)$$

$$RAC = 17,16$$

Assim para cada kg de metano queimado precisam-se de 17,16 kg de ar para completar a mistura.

A massa específica do metano, segundo Kazantsev (1977), é 0,7168 kg/Nm³, como cada grupo gerador consome 7,5 Nm³/h, a massa de metano admitida pelo motor é:

$$\dot{m}_{bg} = \rho_{bg} \cdot \dot{V}_{bg} \quad (13)$$

$$\dot{m}_{bg} = 5,38 \text{ kg/h}$$

A massa de ar admitida para mistura estequiométrica é:

$$\dot{m}_{ar} = 17,16 \cdot \dot{m}_{bg} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{ar} = 92,32 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_d = 97,7 \text{ kg/h}$$

A potência disponível no gás de descarga, tendo como base um único motogerador é dada por:

$$\dot{W}_d = \dot{m}_d c_p \Delta T \quad (15)$$

De acordo com os dados obtidos com o fabricante a temperatura de descarga dos gases queimados é 450°C, considerando uma queda de temperatura nos gases ao passar pelo trocador de 200 °C,

$$\dot{W}_d = 6,08 \text{ kW}$$

8. SECADOR

A razão de massa de lodo a ser submetida ao processo de secagem é 26,82 kg/h.

$$\dot{m} = 0,00745 \text{ kg/s}$$

O lodo é transportado por um sistema tipo parafuso metálico (figura 20), o qual transporta o material da centrífuga para o reservatório, chamado de rosca de transporte envolta por uma armação em aço conforme ilustrado pela figura 21.



Figura 20 - Rosca de transporte da massa de lodo.

Fonte: Imagem feita pelo autor na ETE da Indústria Cervejeira, 11/12/2007.



Figura 21 – Imagens da rosca de transporte. Respectivamente cobertura em aço e parte interna com a rosca transportando o lodo.

Fonte: Imagens feitas pelo autor na ETE da Indústria Cervejeira, 11/12/2007.

A rosca de transporte tem área coberta com 0,13 m de diâmetro e três e meio metros de comprimento, a qual pode suportar elevadas temperaturas. Na parte interna, as pás possuem 0,06 m de diâmetro com espaço de 0,3 m entre elas (figura 22).



Figura 22 – Parte interna da rosca de transporte.

Fonte: Imagem feita autor na ETE da Indústria Cervejeira, 11/12/2007.

A razão de massa de lodo a ser transportada pelo sistema é:

$$\dot{m} = \rho_1 v A \quad (16)$$

v é a velocidade de transporte do parafuso.

ρ_1 é a massa específica do lodo que no caso em estudo é estimada em 850 kg/m³.

A vazão em volume da massa de lodo é dada pela equação:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_1} \quad (17)$$

$$\dot{V} = 8,76 \text{ cm}^3 / \text{s}$$

A configuração geométrica da massa de lodo durante o transporte via parafuso, não é uniforme, porém as partículas de maior dimensão possuem forma esferoidal cujo diâmetro nunca ultrapassa doze milímetros. Considerando que não mais de 40% da vazão ocorre em corpos mais volumosos, e que o restante é composto por pedaços de pequenas dimensões, os quais desidratam primeiro, pode-se calcular a velocidade do lodo no trocador de calor proporcionada pelo parafuso. A camada de lodo no fundo da rosca de transporte pode ser visualizada na fig 23.



Figura 23 – Espessura do lodo ao fundo da rosca de transporte.

Fonte: Imagem feita pelo autor na ETE da Indústria Cervejeira, 11/12/2007.

Para o lodo em questão, supõem-se propriedades físicas próximas da água assim:

$$c_p = 4186 \text{ J / kg K} \text{ e } K = 0,668 \text{ W / kg K} .$$

A dimensão característica L do esferóide de lodo é dada por:

$$L = \frac{V}{A_s} = \frac{D}{6} \quad (18)$$

V - Volume da esfera de lodo

A - Área da superfície externa da massa de lodo.

$$L = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Devido a alta turbulência no interior do secador provocada pelos gases de descarga do motogerador o coeficiente de convecção de calor adotado é 75 W/m²K.

$$B_i = \frac{hL}{k} \quad (19)$$

$$B_i = 0,22 > 0,1$$

Desta forma o tempo de secagem deve ser calculado fazendo uso das cartas de Heisler.

Para garantir uma boa secagem espera-se que o centro da massa de lodo que adentra o sistema a 20°C atinja uma temperatura de 120°C. A temperatura média dos gases no interior do secador é da ordem de 300 °C.

$$B_i^{-1} = 4,5$$

$$\frac{\theta_0}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (20)$$

$$\frac{\theta_0}{\theta_i} = 0,64 \quad (21)$$

Admitindo para o lodo um coeficiente de difusividade térmica da ordem de $4 \cdot 10^{-7}$ m²/s (Kreith, 2003).

$$F_o = \frac{\alpha}{L^2} t, \quad (22)$$

α - difusividade térmica do material.

$$F_o = 0,1 \cdot t, \quad (23)$$

Das cartas para corpos esféricos,

$$F_o = 0,9$$

$$t = 9 \text{ s}$$

A velocidade da massa de lodo no secador dada por:

$$v = \frac{L_m}{t} \quad (24)$$

$$v = 0,28 \text{ m/s}$$

Portanto, para atender as condições acima, a velocidade da massa de lodo no secador não pode ultrapassar 0,28 m/s.

Observa-se que com essa velocidade, caso a massa de lodo fosse geometricamente distribuída em placa uniforme sua área frontal seria:

$$A = \frac{\dot{m}}{\rho v} \quad (25)$$

Por outro lado, caso a massa de lodo tenha geometria uniforme durante o transporte no parafuso, com $\dot{m}$ dado, se tem:

$$\dot{m} = 0,00745 \text{ kg/s}$$

$$A = 32 \text{ cm}^2$$

Caso isto se verifique a secagem ocorre com tempo mais reduzido, pois a desidratação irá ocorrer de forma mais acelerada devido aos torrões de lodo em todo o processo possuírem áreas e geometrias parecidas. Com as características pré-estabelecidas sendo controladas, a secagem do material se fará maior rapidez. A qualidade do produto final, principalmente o teor de umidade, visando atender as condições para a agricultura, será controlada em todo o biossólido que passar pelo processo de secagem com os gases de escape do motogerador. A figura 24 ilustra o sistema de secagem térmica com a utilização do biogás proposto para a indústria cervejeira em análise.



Figura 24 – Sistema de secagem proposto com a entrada e saída do lodo e entrada e saída dos gases de escape dos motogeradores.

Fonte: Imagens feitas pelo autor na ETE da Indústria Cervejeira, 11/12/2007.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que é possível secar todo o lodo gerado pela indústria com apenas três motogeradores, e ainda produzir energia elétrica para a estação de tratamento com potência de 45 kW. Cabe lembrar que o volume de biogás gerado pelo tratamento dos efluentes pode alimentar um conjunto de 16 motogeradores do modelo proposto, com potencial para gerar um total de 248 KW de energia elétrica. O conjunto pode utilizar 90.000 m³ de biogás gerados a cada mês com média 84,18 % de metano, um dos principais gases de efeito estufa, em sua composição e gerar energia elétrica a partir de uma fonte de combustível não utilizada pela indústria. Outro fator importante de salientar foram os resultados das análises do biogás realizado em laboratório especializado, onde a média das amostras analisadas apresentou proporções de metano na faixa de 84% do volume total do gás. O biogás produzido na indústria cervejeira analisada pode ser considerado de boa qualidade já que o composto que é combustível está presente em grande parte da sua composição.

Os volumes de biogás e lodo são proporcionais, com o aumento do volume de lodo, em condições normais de operação o volume de biogás irá aumentar, portanto se o volume de efluente crescer, para se secar o lodo deve-se utilizar um número maior de motogeradores.

O projeto possui fortes características de sustentabilidade, já que os subprodutos (resíduos) do processo são utilizados como combustível (biogás) e adubo (lodo seco), e ainda todo o processo pode ser desenvolvido dentro da empresa, na própria área da estação de tratamento de efluente.

A empresa após o retorno dos investimentos terá grande economia, podendo comercializar ou utilizar na própria indústria seus subprodutos, entre eles o adubo e a energia nobre (mecânica) disponibilizada pelos motogeradores, além de ter a possibilidade de colocar todo o processo nos moldes do mecanismo de desenvolvimento limpo e assim poder comercializar carbono conforme as regras que regem o mercado de carbono.

9. 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 A. 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/UFGM, 221 pp.
- BIO (2001). *Caderno Especial. O saneamento em números*. Revista Bio, jan/mar 2001. ABES. p. 17 – 36.
- BRASIL (2007). Ministério da Ciência e Tecnologia. *Convenção sobre mudança do clima*. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/clima>, acessado em 17 de dezembro de 2007 às 15:09 horas.
- 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
- CAPRA, F. (2002). *The hidden connections: A science for sustainable living*. Ed. Cultrix. São Paulo. p. 300

- 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., 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.
- 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 Environmental 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.

- FEMSA (2007). Sistema de Gestão Integrado ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18000. – Informações Sistema de Gestão Integrado – Jacaré.
- 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.
- 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*.
- GOLDENBERG, 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*.
- HULSHOFF POL, L. W., ZEEW, W., VELZEBOER, C. T., LETTINGA, G. (1983). Granulation in UASB reactors. *Water Science and Technology*, 15, 8, 291-304.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2001). *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC, 2001.
- KAZANTSEV, I.E. (1977). *Industrial Furnaces*. Mir Publishers-Moscow, 375pp.

- KREITH, F., BOHN, M.S. Princípios de Transferência de Calor, Thomson Editora, 2003- São Paulo. 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.
- MESTRE CERVEJEIRO, 2007. Obtido em <http://www.mestre-cervejeiro.com/content/view/33/54/>., disponível em 03/12/2007 às 10:11 h.
- 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 bio sólido das estações de tratamento de esgotos sanitários (ETEs). Subsídios para elaboração de uma norma brasileira. São Paulo, 74 p. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Mackenzie.
- 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.
- THOMAS, D. C., DELVAL, P. (1987). *Utilization du biogas dans les moteurs thermiques*. Informations Chimie n° 283. Paris. p 147-149.
- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (2007). *CDM – Clean Development Mechanism*. Development Mechanism. Disponível em: <http://www.unfccc.int/cdm>, acessado em 17 de dezembro de 2007 às 14:00 hrs.
- USEPA (2000). *Guide to field storage of biossolids*. 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, n° 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.
- WIKIPEDIA, 2007. Obtido em "<http://pt.wikipedia.org/wiki/Mosto> - disponível em 03/12/2007" às 11:32 h.
- ZACHOW, C. R. (2000). Biogás. Panambi, 12 p. *Dissertação de Graduação*.

ZEHNDER, A. J. B., INGVORSEN, K. & MARTI, T. (1982). *Microbiology of the methane bacteria. Anaerobic Digestion 1981*. Elsevier Biomedical Press, Amsterdam, The Netherlands.

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor.

Diego Hamzagic Mendes

Taubaté, fevereiro de 2008.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)