

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANA CAROLINA GUEDES LIMA

FERNANDA CALIMAN PASSAMANI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS
PRODUZIDO NO REATOR UASB DA ETE-UFES**

VITÓRIA
2012

ANA CAROLINA GUEDES LIMA

FERNANDA CALIMAN PASSAMANI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS
PRODUZIDO NO REATOR UASB DA ETE-UFES**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Professor Doutor Ricardo Franci Gonçalves



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO NO REATOR
UASB DA ETE - UFES**

**ANA CAROLINA GUEDES LIMA
FERNANDA CALIMAN PASSAMANI**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Ricardo", is written over a horizontal line.

Prof. Ricardo Franci
Orientador – DEA/CT/UFES

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Rosane", is written over a horizontal line.

Prof.^a Rosane Hein de Campos
Examinadora Externa

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Renato", is written over a horizontal line.

Prof. Renato Siman
Examinador Interno – DEA/CT/UFES

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente à Deus, por nos dar força e perseverança para vencer as barreiras e alcançar os nossos objetivos.

Aos nossos pais e irmãos pela compreensão, carinho e amor. Dedicamos nossas conquistas a vocês, por nos incentivar e apoiar em todos os momentos de nossas vidas.

Ao professor Dr. Ricardo Franci Gonçalves, nosso orientador, pelo apoio e atenção dada desde o início até o fim deste trabalho.

Aos nossos amigos do curso de Engenharia Ambiental, pela amizade e companheirismo durante esses cinco anos de curso.

Aos nossos professores, que nos instruíram em nossa vida acadêmica.

Enfim, agradecemos a todos que nos ajudaram, direta ou indiretamente, a conquistar mais esta vitória. Muito obrigada!

RESUMO

Um dos problemas que atinge o país é a deficiência no tratamento do esgoto doméstico. Em alguns casos, o esgoto coletado não recebe os devidos tratamentos antes de ser lançado no corpo d'água, provocando impactos ambientais. Um dos processos de tratar o esgoto é por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica, que apresenta como um dos resíduos o biogás. O lançamento deste gás para atmosfera representa uma ameaça ambiental, pois tem como principal constituinte o metano, grande responsável pelo efeito estufa. O biogás, por apresentar um alto potencial energético, pode ser utilizado para gerar calor ou eletricidade. Essa prática, além de evitar a emissão do gás para a atmosfera, traz vantagens econômicas. Diante disso, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. Foi necessário conhecer a caracterização quali-quantitativa deste biogás, quantificar seu potencial térmico e elétrico, e realizar um levantamento para a utilização energética do biogás gerado em ETEs. O biogás bruto da ETE-UFES apresentou uma vazão média de 5,486 m³/dia, constituído por CH₄ (77,33%), CO₂ (4,50%), O₂ (2,81%), N₂ (15,81%) e H₂S (0,17%). Após passar por um processo de purificação, houve a remoção total do gás sulfídrico e aumento do teor de metano no biogás. A partir do cálculo do potencial elétrico do biogás produzido na ETE-UFES, verificou-se que a sua conversão em eletricidade é inviável. Isso se justifica pela baixa vazão de esgoto que chega à ETE. Apesar dessa verificação, foram estudados e levantados os procedimentos para o aproveitamento energético do biogás com o objetivo de auxiliar trabalhos futuros. A partir dessa pesquisa, observa-se que a utilização da energia do biogás no Brasil ainda se encontra limitada. Faz-se necessário mais investimento, incentivos e pesquisas nesta área a fim de romper barreiras tecnológicas, econômicas e políticas e tornar o uso do biogás mais promissor nos próximos anos.

Palavras-chave: aproveitamento energético, biogás, reator UASB, ETE.

ABSTRACT

One of the main concerns of this country is the deficiency of domestic wastewater treatment. In some cases, the sewage collected does not receive the correct treatment before to be discharged to the waterbody, causing environmental impacts. A kind of sewage treatment process is using anaerobic digestion of organic matter, generating an important residue, the biogas. The biogas release to the atmosphere can be an environmental threat, because the main compound in biogas mixture is methane, which is a potent greenhouse gas. The biogas can be used to generate thermal or electrical energy, since it has a high energetic potential. This practice avoids the biogas emission to the atmosphere and brings economic advantages. In view of that, this work aims to evaluate the energetic potential of biogas generated from the anaerobic system in UASB reactor of ETE-UFES. It was necessary to know the qualitative and quantitative characterization of biogas, quantify its thermal and electrical energy, and conduct a survey of procedures for the energy use of biogas produced in ETEs. The raw biogas presented a production of 5,486 m³/d, comprised by CH₄ (77,33%), CO₂ (4,50%), O₂ (2,81%), N₂ (15,81%) and H₂S (0,17%). Then, the biogas passed through a clean up process, getting a total removal of sulfidric acid and increasing the methane concentration. The calculation of biogas energetic potential demonstrated that its use for electric energy generation is unfeasible. This is explained because of the low sewage volumetric production. Despite this, procedures about energetic use of biogas were studied to help future projects. With this research it was realized that the energetic use of biogas on Brazil is still limited. It is necessary more investments, incentives and research in this area to break technological, economic and political barriers and become the biogas use more promising in next years.

Key-words: energetic use of biogas, biogas, UASB reactor, Sewage Treatment Plant

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema convencional de tratamento de esgotos.....	20
Figura 2: Representação Esquemática de um Reator UASB.....	22
Figura 3: Esquema das etapas do processo de digestão anaeróbia.	27
Figura 4: Balanço de massa do reator UASB	35
Figura 5: Esquema da conversão do biogás em energia elétrica.....	39
Figura 6: Detalhes construtivos de uma turbina a gás	40
Figura 7: Componentes da microturbina.....	41
Figura 8: Foto de um motor de combustão interna operando num sistema de cogeração	42
Figura 9: Estação experimental de tratamento de esgoto da UFES.....	48
Figura 10: Plano de amostragem da análise de DQO.....	49
Figura 11: Medidor de vazão	50
Figura 12: Plano de amostragem da caracterização qualitativa do biogás.....	51
Figura 13: (a) - Selo hídrico; (b) - cilindro com palha de aço	51
Figura 14: Aparato de lavagem = Selo hídrico + Cilindro com palha de aço.....	52
Figura 15: Reservatório de Metano	52
Figura 16: Monitoramento da Vazão Média Diária de Esgoto.....	56
Figura 17: Monitoramento da Vazão Média Diária de Biogás Produzido no Reator UASB	56
Figura 18: Fluxograma das rotas do biogás após ser coletado no reator UASB	64
Figura 19: Sistema de purificação do biogás adotado por Pecora (2006)	67
Figura 20: Gasômetro utilizado na pesquisa de Costa (2006)	69
Figura 21: Leito de secagem da ETE-UFES	70

Figura 22: Método de secagem do lodo adotado por Andreoli *et al.* (2002). (a)

Aquecedores em série para a queima do biogás; (b) Leito de secagem aquecido por óleo.....73

Figura 23: Método de secagem do lodo adotado por Ferreira (2001)73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Possíveis percentuais dos constituintes do biogás	30
Tabela 2: Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás	31
Tabela 3: Comparativo do Poder Calorífico do biogás com outros gases	31
Tabela 4: Relação comparativa de 1m ³ de biogás com combustíveis usuais	31
Tabela 5: Principais etapas do gerenciamento do lodo.....	38
Tabela 6: Necessidade de remoção de compostos gasosos de acordo com a utilização do biogás	43
Tabela 7: Concentração da DQO no esgoto bruto, na entrada e saída do reator UASB	57
Tabela 8: Estatísticas relativas durante os 141 dias de monitoramento	57
Tabela 9: Correlação entre o volume de CH ₄ e massa de DQO removida.....	58
Tabela 10: Perdas de metano encontradas por outras metodologias	59
Tabela 11: Composição do biogás produzido na ETE- UFES	59
Tabela 12: Composição do biogás lavado.....	60
Tabela 13: Comparação na composição do biogás bruto e lavado	61
Tabela 14: Sistemas de armazenamento de biogás.....	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Vantagens e desvantagens do reator UASB.....	23
Quadro 2: Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.....	24
Quadro 3: Demanda de energia de alguns sistemas de tratamento de esgoto	25
Quadro 4: Vantagens e empecilhos à utilização do biogás em ETEs	36
Quadro 5: Técnicas de remoção de impurezas do biogás	45
Quadro 6: Principais características do sistema de purificação do biogás de diferentes ETEs pesquisadas	66
Quadro 7: Parâmetros de gasômetros utilizados em pesquisas sobre biogás	69
Quadro 8: Principais características de dois sistemas de secagem do lodo de esgoto utilizando biogás gerado na própria ETE.....	72
Quadro 9: Principais características das tecnologias de conversão	74
Quadro 10: Estudos de caso para geração de energia elétrica a partir do biogás.....	76
Quadro 11: Principais vantagens e desvantagens das tecnologias de conversão.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BF	Biofiltro
CESAN	Companhia Espírito Santense de Saneamento
CH ₃ COOH	Ácido Acético
CH ₄	Metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Fe ³⁺ /EDTA	Ácido Etilenodiamino Tetra-Acético de Fe ³⁺
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
H ₂ S	Gás Sulfídrico ou Sulfeto de Hidrogênio
N ₂	Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NH ₃	Amônia
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
PCI	Poder Calor Inferior
pH	Potencial Hidrogeniônico
PUREFA	Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
n_{gerador}	Rendimento do gerador
n_{tec}	Eficiência da tecnologia de conversão
°C	Graus Celsius
DQO_{CH_4}	Carga de DQO removida no reator e convertida em metano
E_e	Energia elétrica gerada
E_t	Energia térmica disponível no biogás
K	DQO correspondente a 1 mol de CH_4
$K(t)$	Fator de correção para temperatura de operação reator
P	Pressão atmosférica
$\text{PCI}_{\text{biogás}}$	Poder calorífico inferior do biogás
PCI_{CH_4}	Poder calorífico inferior do metano
$\text{PE}_{\text{biogás}}$	Potência elétrica do biogás
$Q_{\text{biogás}}$	Vazão média do biogás medida
R	Constante universal dos gases
T	Temperatura de operação do reator
t_{CH_4}	Teor de metano na composição do biogás lavado
$T_{\text{operação}}$	Tempo de operação do motor
V_{CH_4}	Volume de metano produzido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	JUSTIFICATIVA.....	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1	Tratamento de esgoto	18
4.1.1	Níveis de tratamento.....	18
4.1.2	Reator Anaeróbio de Manta de lodo e Fluxo Ascendente (RAFA).....	20
4.1.3	Tratamento anaeróbio + aeróbio.....	23
4.1.4	Demanda de energia.....	25
4.2	Formação do biogás	25
4.2.1	Processo de formação do biogás	26
4.2.2	Fatores que influenciam a produção de biogás.....	27
4.3	Características do biogás	29
4.4	Quantificação do volume de biogás produzido	32
4.4.1	Produção teórica do biogás	32
4.4.2	Medição do biogás	33
4.5	Perdas de Metano	33
4.6	Balanço de Massa.....	34
4.7	Aplicações do biogás.....	36
4.7.1	Utilização do potencial térmico do biogás	37
4.7.1.1	Aplicação da energia térmica do biogás na secagem e higienização do lodo	37
4.7.2	Conversão para energia elétrica	39
4.7.2.1	Turbina a gás	39
4.7.2.2	Microturbina a gás.....	40
4.7.2.3	Motores de combustão interna.....	41
4.8	Purificação do biogás	42
4.8.1	Substâncias que devem ser removidas de acordo com a aplicação do biogás	43

4.8.2	Técnicas de remoção de impurezas do biogás	44
5	METODOLOGIA	46
5.1	Etapa 1: Caracterização quali-quantitativa do biogás produzido na ETE-UFES ⁴⁷	
5.1.1	Monitoramento	47
5.1.2	Fase Líquida.....	49
5.1.3	Fase Gasosa	49
5.2	Etapa 2: Cálculo da energia disponível no biogás produzido na ETE-UFES ⁵³	
5.3	Etapa 3: Levantamento dos procedimentos para a utilização energética do biogás gerados em ETEs.....	55
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6.1	Caracterização quantitativa do biogás da ETE-UFES	55
6.2	Caracterização qualitativa do biogás da ETE-UFES.....	59
6.3	Energia disponível no biogás produzido na ETE-UFES	61
6.4	Levantamento de procedimentos para a utilização energética do biogás gerados em ETE-UFES	63
6.4.1	Purificação do biogás.....	64
6.4.2	Armazenamento do biogás	67
6.4.3	Secagem e desinfecção do lodo com o calor do biogás	70
6.4.4	Conversão do biogás em energia elétrica	74
7	CONCLUSÃO.....	78
8	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
10	ANEXO	87

1 INTRODUÇÃO

Um problema que atinge várias cidades do país é a deficiência no tratamento do esgoto doméstico. Na maioria dos casos, o esgoto coletado nas áreas urbanas não recebe nenhum tipo de tratamento antes de ser despejado nos cursos d'água, gerando vários impactos ambientais. O esgoto deve ser direcionado às estações de tratamento de esgoto (ETEs), onde passam por uma série de processos, a fim de diminuir o seu potencial poluidor antes de retorná-lo ao meio ambiente (COSTA, 2006).

No Brasil, as estações de tratamento de esgoto comumente utilizam o processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica para reduzir a contaminação do efluente. Até a década de 1970, o uso desses processos era restrito basicamente às lagoas anaeróbias, aos decanto-digestores e aos digestores de lodos produzidos no tratamento da fase líquida de ETEs. No começo da década de 1980, iniciaram-se estudos para a utilização do reator de manta de lodo (UASB) no Brasil. Visto sua simplicidade, altas taxas de tratamento, produção de lodo já estabilizado e um custo bastante atraente, este tipo de tratamento apresentou uma maior tendência de implantação a partir da década de 1990 (CHERNICHARO, 2001).

O reator UASB constitui-se de uma câmara fechada, por onde o esgoto passa em sentido ascendente e é degradado anaerobicamente, levando à diminuição do volume de sólidos e estabilização do lodo, gerando também como resíduo o biogás.

O biogás proveniente das ETEs é composto principalmente por metano, importante causador do efeito estufa. Uma alternativa frequentemente empregada para diminuir os impactos ambientais provocados pela emissão dos gases constituintes do biogás, consiste em queimá-los em *flare*, convertendo o metano em dióxido de carbono, o qual é 21 vezes menos nocivo ao meio ambiente em relação ao metano (CENBIO, 2000).

O aproveitamento energético do biogás derivado das ETEs é uma prática adotada por vários países. O biogás pode ser destinado à queima direta para gerar energia térmica ou pode ser convertido em energia elétrica. Essa utilização do biogás, além de evitar a emissão do gás metano à atmosfera, representa uma nova alternativa na

matriz energética do país. A redução dos gases de exaustão também acaba com o forte odor oriundo da digestão anaeróbia do lodo (ICLEI, 2010).

A produção de energia térmica, segundo Pecora (2006), é obtida pela queima direta do biogás, através de aquecedores, esquentadores, fogões ou caldeiras, podendo ser utilizada como fonte de calor em algumas operações da ETE. A alternativa de gerar energia elétrica a partir do biogás necessita de um equipamento de conversão. Para haver o aproveitamento energético (térmico ou elétrico) do biogás, este deve seguir basicamente 4 etapas: captação do gás; purificação (remoção de partículas e outros contaminantes); armazenamento do gás; e a queima direta ou conversão do gás em energia elétrica (COSTA *et al.*, 2001). É importante destacar que a necessidade de purificar o biogás depende da sua aplicação.

O presente trabalho irá avaliar o potencial energético do biogás gerado na Estação de Tratamento de Esgoto da Universidade Federal do Espírito Santo (ETE-UFES) a partir de dados da sua caracterização quali-quantitativa. Serão apresentadas as etapas que o biogás deve seguir para ocorrer o seu aproveitamento energético, como também as técnicas e equipamentos já utilizados em pesquisas nesta área.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a disponibilidade energética do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o biogás produzido em reatores UASB utilizados em estações de tratamento de esgoto
- Conhecer a caracterização quali-quantitativa do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES

- Analisar o potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES
- Fazer um levantamento dos procedimentos para a utilização energética do biogás de ETEs

3 JUSTIFICATIVA

O Brasil ainda apresenta deficiências no saneamento básico. Em algumas cidades, o esgoto doméstico não passa pelo processo de tratamento de efluentes antes de ser lançados nos corpos d'água. A forma mais adequada seria coletar e encaminhar os efluentes a uma estação de tratamento para reduzir a sua contaminação e, então, retornarem aos corpos d'água, sem causar problemas ambientais.

Algumas operações em ETEs demandam um elevado consumo de energia, tornando o custo operacional alto. O aproveitamento energético do biogás, gerado nos reatores anaeróbios, para ser aplicado na própria ETE proporcionaria uma redução dos custos com energia e ainda uma maior eficiência do processo de tratamento de efluentes.

O biogás gerado em ETEs apresenta várias possibilidades de uso. Além da aplicação da sua energia na própria ETE, pode ser utilizado para iluminação a gás, uso veicular ou entregar a energia gerada à rede elétrica. O aproveitamento energético do biogás também traz vantagens ambientais, uma vez que reduz a emissão de metano para a atmosfera.

Desta forma, o estudo da utilização energética do biogás torna-se de suma importância, visto que existem várias possibilidades de uso, inclusive aplicação da energia nas operações da própria ETE, trazendo benefícios econômicos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Tratamento de esgoto

O tratamento do esgoto sanitário inicia-se na rede coletora, a qual tem como função o transporte do mesmo até a Estação de Tratamento de Esgotos. A ETE é a unidade responsável pelo tratamento do esgoto e destinação dos subprodutos ali gerados, inclusive os sólidos, usualmente designados pelo termo “lodo”. Os efluentes não atendidos pela rede de coleta de esgotos, normalmente têm de utilizar soluções individuais de tratamento (JORDÃO & PESSOA, 2009).

Em menor espaço e tempo, as ETEs reproduzem a capacidade natural que os cursos d'água têm de decompor a matéria orgânica, pois os principais agentes de tratamento (bactérias aeróbias ou anaeróbias) encontram nela condições mais favoráveis, reproduzindo-se em grande escala ao efetuar a degradação da matéria orgânica contida nos esgotos (FRANÇA JUNIOR, 2008).

Há diversas formas de tratar o esgoto sanitário, sendo que o emprego dessas formas de tratamento vai depender dos objetivos do tratamento (principais constituintes a serem removidos), da eficiência, da confiabilidade, da disposição do lodo, dos requisitos de área, dos impactos ambientais, dos custos de operação e de implantação, da sustentabilidade e da simplicidade do tratamento (VON SPERLING, 2005). A fim de adotar a melhor alternativa técnica e econômica, devem ser analisados os sistemas de tratamento individualmente, sabendo que é possível empregar processos unitários ou combinados que irão ou remover as substâncias indesejáveis ou transformá-las em outras que sejam menos agressivas ao meio ambiente.

4.1.1 Níveis de tratamento

Segundo von Sperling (2005), os níveis de tratamento convencional dos esgotos podem ser classificados da seguinte forma:

- Tratamento preliminar ou pré-tratamento: objetiva apenas a remoção dos sólidos grosseiros por meio de processos físicos.
- Tratamento primário: visa à remoção de sólidos sedimentáveis a partir de mecanismos físicos de remoção de poluentes.
- Tratamento secundário: tem como principal objetivo a remoção de matéria orgânica e, eventualmente, nutriente como nitrogênio e fósforo, utilizando-se processos biológicos.
- Tratamento terciário: objetiva a remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis) ou ainda, a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário.

O tratamento preliminar destina-se principalmente para remoção de sólidos grosseiros, por meio de grades e peneiras, e areia, que ocorre nos desarenadores através da sedimentação dos grãos. Além do gradeamento e do desarenador, o tratamento preliminar possui também um medidor de vazão, sendo utilizada usualmente uma calha parshall. Portanto, tem-se que os mecanismos básicos de remoção nessa etapa do tratamento são de ordem física(VON SPERLING, 2005).

Os sólidos em suspensão sedimentáveis e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em suspensão são removidos no tratamento primário, por processo simples, como a sedimentação. Os tanques de decantação, ou decantadores primários, constituem o tipo de sistema utilizado nessa etapa do tratamento, em que o esgoto flui vagarosamente através destes, permitindo que os sólidos em suspensão sedimentem gradualmente no fundo(VON SPERLING, 2005).

O tratamento secundário visa remover por mecanismos biológicos os sólidos não sedimentáveis (constituídos por DBO solúvel e DBO suspensa), que não foram retirados no tratamento anterior, nutrientes como nitrogênio e fósforo e eventualmente alguns patógenos. Os microrganismos (bactérias, protozoários, fungos, e outros) convertem a matéria orgânica em gás carbônico, água e material celular (crescimento e reprodução dos microrganismos). Existem vários métodos de tratamento neste nível, sendo os mais comuns as lagoas de estabilização e variantes, processos de disposição no solo, reatores anaeróbios, lodos ativados e

variantes e reatores aeróbios com biofilmes. O tratamento secundário pode ou não incluir as unidades de tratamento primário (VON SPERLING, 2005).

Para o lançamento final do esgoto no corpo receptor, às vezes é necessário proceder à desinfecção das águas residuais tratadas para a remoção dos organismos patogênicos ou, em casos especiais, à remoção de determinados nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo, que podem potenciara eutrofização das águas receptoras. Esta etapa consiste no tratamento terciário(MELLO, 2007).

A Figura 1apresenta o detalhamento dos níveis de tratamento em um sistema convencional de tratamento de esgotos.

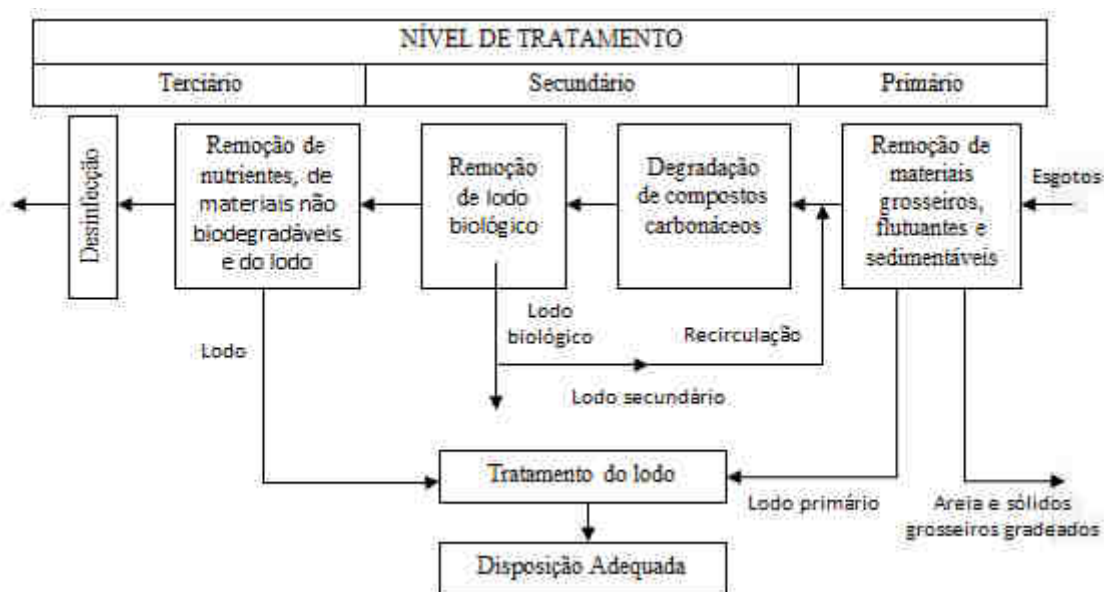


Figura 1: Sistema convencional de tratamento de esgotos

Fonte: Adaptado de Campos (1999)

4.1.2 Reator Anaeróbio de Manta de lodo e Fluxo Ascendente (RAFA)

Segundo Jordão & Pessoa (2009), o reator UASB (*“Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor”*) ou reator RAFA (*“Reatores Anaeróbios de Fluxo ascendente”*) surgiu nos anos 1970 na Holanda, na Universidade de Wageningen, como um modelo de reator anaeróbio, caracterizado por possuir a entrada de esgoto pelo fundo, em fluxo ascendente, e por dispor na parte superior do reator um sistema de separação das fases líquida, sólida e gasosa, com lodo suspenso e formando flocos e grânulos.

Neste reator, a biomassa cresce dispersa no meio, e não aderida a um meio suportem, como nos biofiltros. Ao crescer, a biomassa forma pequenos grânulos correspondentes à aglutinação de diversas bactérias. São estes grânulos ou focos que servirão de meio suporte para outras bactérias (VON SPERLING, 2005).

Este sistema de tratamento tem a capacidade de reter grandes quantidades de biomassa, de elevada atividade, mesmo com a aplicação de baixos tempos de detenção hidráulica. Portanto, os reatores compactos apresentam volumes reduzidos aos digestores anaeróbios convencionais e ainda mantem alto grau de estabilização da matéria orgânica (COSTA, 2006).

O reator é constituído pelas seguintes partes (JORDÃO & PESSOA, 2009):

- Câmara de digestão: é a parte inferior do reator, onde se localiza a manta de lodo e onde se processa a digestão anaeróbia. O esgoto entra pelo fundo do reator e passa pela manta de lodo, em sentido ascendente, é nesta manta que a matéria orgânica permanece e é digerida anaerobicamente.
- Separador trifásico: é um separador físico, que delimita a fase sólida, a zona de sedimentação, a fase líquida, por onde será coletado o efluente tratado, e a fase gasosa, uma câmara de coleta de biogás.
- Zona de transição: entre a câmara de digestão e a zona de sedimentação superior.
- Zona de sedimentação: dentro do reator ocorre a sedimentação dos sólidos e flocos, que retornam à manta de lodo escorrendo pelas paredes do reator.
- Zona de acumulação de gás: o biogás produzido no processo de digestão sobe e fica acumulado na parte superior do reator, onde é coletado eventualmente aproveitado.

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática de um reator UASB:

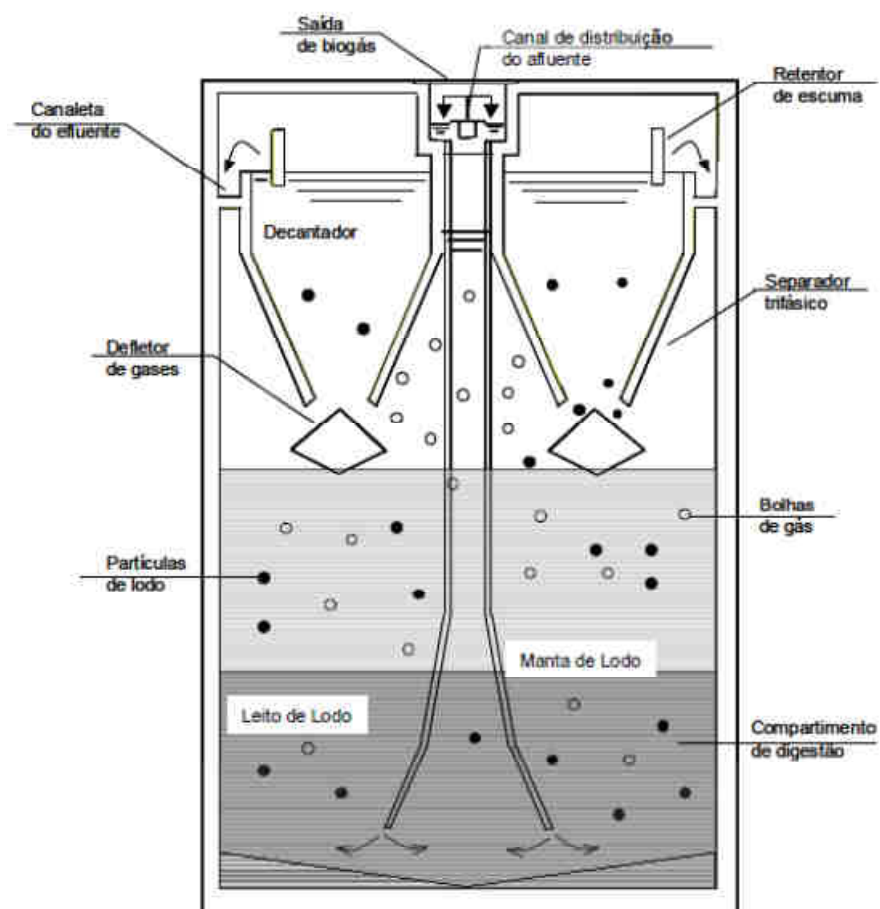


Figura 2: Representação Esquemática de um Reator UASB

Fonte: Versiani (2005)

Von Sperling (2005) simplifica as vantagens e as desvantagens da utilização deste sistema, como pode ser visualizado no Quadro 1:

Quadro 1: Vantagens e desvantagens do reator UASB

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Satisfatória eficiência na remoção de DBO₅ • Baixos requisitos de área • Baixos custos de implantação e operação • Reduzido consumo de energia • Não necessita de meio suporte • Construção, operação e manutenção simples • Baixíssima produção de lodo • Estabilização do lodo no próprio reator • Necessidade apenas da secagem e disposição final do lodo • Rápido reinício após períodos de paralisação 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento bem restritivos • Possibilidade de efluentes com aspecto desagradável • Remoção de nitrogênio e fósforo insatisfatória • Possibilidade de maus odores (embora possam ser controlados) • A partida do processo é geralmente lenta • Relativamente sensível a variações de carga • Usualmente necessita de pós-tratamento

Fonte: Von Sperling (2005)

4.1.3 Tratamento anaeróbio + aeróbio

Os sistemas de tratamento de águas residuárias podem ser classificados, na etapa de tratamento biológico, como sistemas aeróbios e anaeróbios.

Os sistemas anaeróbios encontram uma grande aplicabilidade no país. As diversas características favoráveis destes sistemas, aliadas às condições ambientais no Brasil têm contribuído para a colocação dos sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos em posição de destaque, particularmente os reatores de manta de lodo (reatores UASB). Hoje em dia, praticamente todas as análises de alternativas de tratamento incluem esses reatores como uma das principais opções (CHERNICHARO, 1997).

O Quadro 2 exibe algumas das vantagens da digestão anaeróbia em relação ao tratamento aeróbio, notadamente no que se refere à produção de gás metano e à baixíssima produção de sólidos.

Quadro 2: Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Baixa produção de sólido, cerca de 5 a 10 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios; • Baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos; • Baixa demanda de área; • Baixos custos de implantação, da ordem de R\$ 20 a 40 <i>per capita</i>; • Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico; • Possibilidade de preservação de biomassa sem alimentação do reator, por vários meses; • Tolerância a elevadas cargas orgânicas; • Aplicabilidade em pequena e grande escala; • Baixo consumo de nutrientes. 	<ul style="list-style-type: none"> • As bactérias anaeróbias são susceptíveis à inibição por grande número de compostos • A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semente adaptado; • Algumas formas de pós-tratamento é usualmente necessária; • A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser estudadas; • Possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis; • Possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável; • Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória.

Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997)

Existe um consenso, porém, de que na maioria das aplicações, os sistemas anaeróbios devem ser encarados como uma primeira etapa do tratamento, por apresentarem dificuldades em produzir um efluente que se enquadre dentro da nossa legislação ambiental (COURA & VAN HAANDEL, 1999). Tem-se buscado, assim, a utilização de sistemas combinados de tratamento, procurando-se obter as enormes vantagens de incorporação de um sistema anaeróbio como primeiro estágio de tratamento, seguido de uma unidade de pós-tratamento, como uma forma de adequar o efluente tratado aos requisitos da legislação ambiental, protegendo os corpos d'água receptores dos lançamentos. O principal papel do pós-tratamento é o de completar a remoção da matéria orgânica, bem como de proporcionar a remoção de constituintes pouco afetados no tratamento anaeróbio (nutrientes e patogênicos) (GONÇALVES *et al.*, 1997).

Aliando os tratamentos anaeróbio e aeróbio é possível, segundo Veronez (2001), obter as seguintes vantagens: melhor qualidade do efluente tratado, menor custo de energia, menores volumes de lodo, menos unidades a serem implantadas, menos equipamentos eletromecânicos e simplicidade operacional.

4.1.4 Demanda de energia

A demanda de energia para operação da estação de tratamento de esgoto vai depender do tipo de sistema adotado. Von Sperling (2005) apresenta a demanda de energia para cada configuração, como pode ser observado no quadro abaixo.

Quadro 3: Demanda de energia de alguns sistemas de tratamento de esgoto

Configuração	Demanda de energia (kWh/hab.ano)
UASB	0
Lodos ativados convencionais	18-26
Filtro biológico de alta taxa	0
Lodos ativados por aeração prolongada	20-35
Lodos ativados de alta taxa	Não informa
UASB + Lodos ativados convencionais sem nitrificação	14-20
UASB + Lodos ativados convencionais com nitrificação	Não informa
UASB + filtro biológico de alta taxa	0
Lagoas aeradas + lagoas de decantação	16-22
UASB + Biofiltro aerado submerso sem nitrificação	14-20

Fonte: Von Sperling (2005)

4.2 Formação do biogás

O biogás é uma mistura gasosa combustível, geralmente incolor, inodoro e insolúvel em água, resultante da digestão anaeróbia de matéria orgânica através da ação de vários grupos microbianos. Este gás pode ser proveniente de resíduos sólidos ou líquidos, de origem rural, urbano ou industrial, como também pode ser produzido naturalmente em pântanos, mangues, lagos e rios (FRANÇA JÚNIOR, 2008).

Segundo Costa (2006), a digestão anaeróbia consiste num processo onde os microrganismos atacam a estrutura de materiais orgânicos completos para produzir compostos simples, como o metano e o dióxido de carbono, deixando na solução

aquosa subprodutos como amônia, sulfetos e fosfatos. Simultaneamente as bactérias extraem a energia e os compostos necessários para o seu crescimento.

4.2.1 Processo de formação do biogás

A transformação da matéria orgânica em diversas substâncias químicas, no decurso da digestão anaeróbia, processa-se através de uma cadeia de degradações sucessivas devidas a diferentes tipos de microrganismos. A formação do biogás envolve basicamente três etapas, sendo elas a fermentação, a acetogênese e a metanogênese (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

O processo de fermentação é dividido em duas fases, a hidrólise e a acidogênese. Na primeira fase, as bactérias hidrolíticas convertem a matéria orgânica em moléculas menores, ou seja, proteínas em peptídeos e aminoácidos, polissacarídeos em monossacarídeos, gorduras em ácidos graxos. Essa degradação é feita pela ação de enzimas extracelulares, uma vez que os polímeros orgânicos, por serem de tamanho consideravelmente grande, não conseguem penetrar no interior das células bacterianas. Em seguida, durante a acidogênese, as bactérias transformam os produtos da fase anterior em ácidos solúveis, álcoois e outros compostos (CHERNICHARO, 1997).

Na acetogênese, ocorre a conversão dos produtos obtidos na fermentação em ácidos acéticos (CH_3COOH), hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2), que são os substratos para as arqueas da fase seguinte (CHERNICHARO, 1997).

Na fase da metanogênese ocorre a formação de metano, decorrente da ação das arqueas metanogênicas, as quais são obrigatoriamente anaeróbias e extremamente sensíveis a mudanças na temperatura e no pH. As arqueas metanogênicas transformam o hidrogênio (H_2), o dióxido de carbono (CO_2) e o ácido acético (CH_3COOH), obtidos na etapa anterior, em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994), conforme verificado na Figura 3.

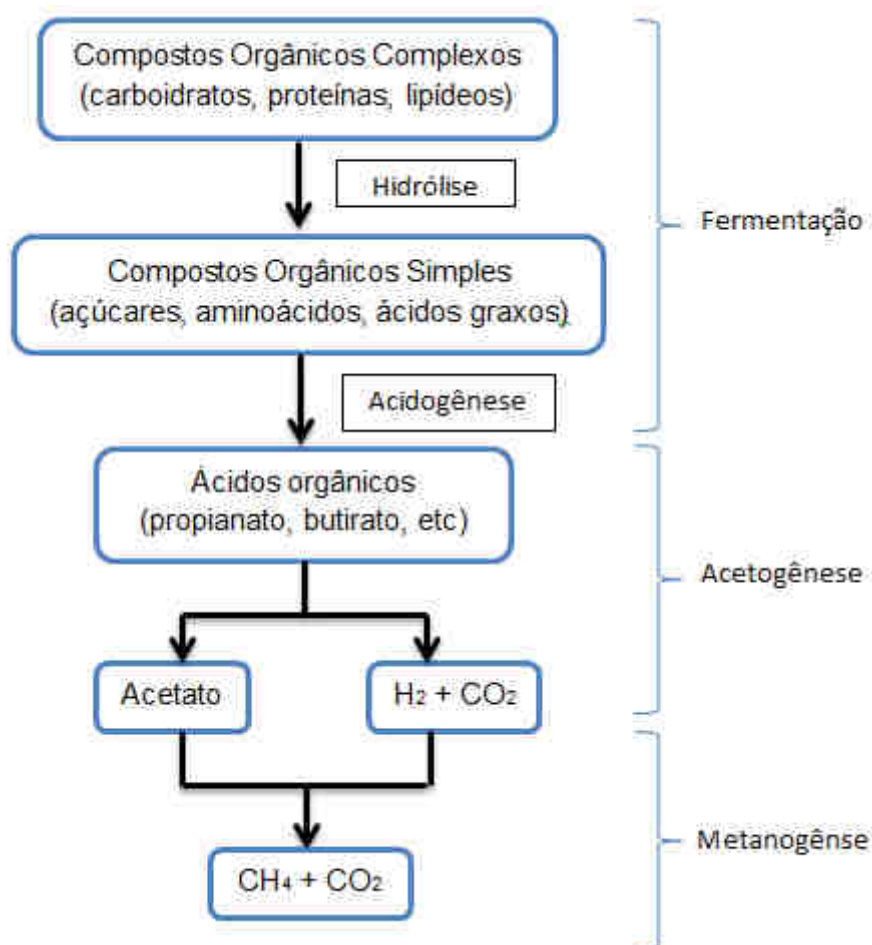


Figura 3: Esquema das etapas do processo de digestão anaeróbia.

Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997).

4.2.2 Fatores que influenciam a produção de biogás

Os principais parâmetros da digestão anaeróbia relacionados à produção de biogás são a composição do substrato, teor de água, temperatura, pH e a impermeabilidade ao ar.

- Composição do substrato

O crescimento e a diversificação das populações microbianas em sistemas de tratamento relacionam-se diretamente com a concentração de nutrientes, os quais fornecem energia necessária para o crescimento celular (LUIZ, 2007).

Os principais nutrientes dos microrganismos são carbono, nitrogênio e sais orgânicos. A relação carbono/nitrogênio deve estar entre 20:1 e 30:1. Outro importante nutriente para o processo anaeróbio é o fósforo, uma vez que a sua

ausência interrompe a fermentação (COSTA, 2006). O enxofre também apresenta importância para as arqueas metanogênicas, pois ele é necessário para a síntese de proteínas.

Além do nitrogênio, fósforo e enxofre, os quais, juntamente com o carbono e oxigênio, constituem as macromoléculas das células microbianas, um grande número de outros elementos tem se mostrado necessário ao processo da digestão anaeróbia, denominados de micronutrientes. Os principais micronutrientes requeridos pelas bactérias que formam o metano a partir do acetato são o ferro, cobalto, níquel e o molibdênio (CHERNICHARO, 1997).

Deve-se evitar a presença de substâncias tóxicas, detergentes e outros produtos químicos, pois eles podem provocar intoxicação e morte dos microrganismos, prejudicando a geração de biogás (OLIVEIRA, 2009).

- Teor de água

O teor de água dentro do biodigestor deve variar de 60 a 90% do peso do conteúdo total (PECORA, 2006).

- Temperatura

A temperatura tem uma grande influência na atividade enzimática dos microrganismos formadores de metano. A formação de metano pode ocorrer numa faixa bastante ampla, entre 0 °C e 97 °C, porém a porcentagem de metano na constituição do biogás é maior quando o processo de fermentação ocorre nas seguintes faixas de temperatura: 30 a 35 °C para mesófilas ou de 50 a 55 °C para termófilas. Embora sejam desejadas temperaturas mais elevadas para que se obtenha maior desenvolvimento da flora microbiana, o mais importante é a manutenção de uma temperatura uniforme dentro dos reatores, pois variações bruscas de temperatura podem provocar o desequilíbrio entre as populações microbianas envolvidas, com consequente falha no processo (CHERNICHARO, 1997).

- pH

O pH tem fundamental importância para a manutenção do crescimento ótimo dos microrganismos e dos processos de conversão nos sistemas anaeróbios. As arqueas metanogênicas apresentam um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,8 e 7,4, enquanto que as bactérias acidogênicas têm crescimento ótimo na faixa de pH entre 5,0 e 6,0. Visto isso, o pH nos reatores anaeróbios deve ser mantido próximo ao neutro para favorecer a produção de metano e impedir a predominância de bactérias produtoras de ácidos, as quais poderiam prejudicar todo o processo bioquímico de transformação do material orgânico, provocando a queda da produção do biogás (METCALF & EDDY, 2003).

- Impermeabilidade ao ar

As arqueas metanogênicas, as quais produzem o metano e o dióxido de carbono, são estritamente anaeróbias. Sendo assim, a decomposição de matéria orgânica na presença de oxigênio irá produzir apenas dióxido de carbono (PECORA, 2006).

Outros fatores que interferem na produção de biogás são: o tipo de reator, em que as características da mistura do substrato são importantes; a atividade metanogênica; o tempo de residência celular; a facilidade ou não de separação das fases líquidas, sólidas e gasosas dos produtos formados no reator; a presença de substâncias inibidoras e ou limitantes do próprio processo (como o excesso de ácidos graxos voláteis e produtos alcalinos); as variações nos parâmetros quantitativos operacionais do reator, tais como a vazão, a carga, o tempo de detenção hidráulica (TDH) e a velocidade do fluxo.

4.3 Características do biogás

Os principais constituintes do biogás são o metano e o gás carbônico, havendo também baixas concentrações de monóxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, amônia, entre outros (CASSINI, 2003). A Tabela 1 apresenta a porcentagem de cada constituinte presente no biogás.

Tabela 1: Possíveis percentuais dos constituintes do biogás

Metano (CH ₄)	50% a 75%
Dióxido de carbono (CO ₂)	25% a 40%
Hidrogênio (H ₂)	1% a 3%
Nitrogênio (N ₂)	0,5% a 2,5%
Oxigênio (O ₂)	0,1% a 1%
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0,1% a 0,5%
Amônio (NH ₃)	0,1% a 0,5%
Monóxido de Carbono (CO)	0% a 0,1%
Água (H ₂ O)	Variável

Fonte: Cassini(2003)

Como qualquer outro gás, as características do biogás dependem da temperatura, pressão, concentração de metano e concentração de gases inertes e/ou ácidos.

O biogás possui densidade menor que o ar e por isso apresenta menor risco de explosão à medida que sua acumulação se torna mais difícil. Em condições normais de produção não é considerado tóxico, por apresentar entre 0% e 0,1% de teor de monóxido de carbono. Todavia as impurezas do biogás o tornam muito corrosivo, principalmente devido a presença de gás sulfídrico, que entre outros materiais, ataca cobre, latão e aço (CRIBARI, 2004).

O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a concentração de metano existente na mistura gasosa, portanto, o biogás é mais energético quando sua quantidade de metano for maior, conforme verificado na Tabela 2.

Tabela 2: Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás

Composição Química do Biogás	Peso Específico (Kg/Nm³)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	Poder Calorífico Inferior (kcal/Nm³)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43	856,06
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2338,52	3424,29
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4229,98	5136,46
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4831,14	5564,50
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6253,01	6420,59
95% CH ₄ , 5% CO ₂	0,7768	10469,6	8132,78
99% CH ₄ , 1% CO ₂	0,7268	11661,02	8475,23

Fonte: Adaptado de Avellar (2001)

Além de fazer um quadro comparativo entre o poder calorífico do biogás com outros gases (Tabela 3), também é possível apresentar uma relação comparativa do biogás com outros combustíveis usuais, em termos de equivalência de 1m³, mostrado na Tabela 4.

Tabela 3: Comparativo do Poder Calorífico do biogás com outros gases

Gás	Poder Calorífico (Kcal/Nm³)
Biogás	5500
Butano	28000
Gás de cozinha- GLP	25775
Gás natural	7600
Metano	8500
Propano	22000

Fonte: Adaptado de Cribari(2004)

Tabela 4: Relação comparativa de 1m³ de biogás com combustíveis usuais

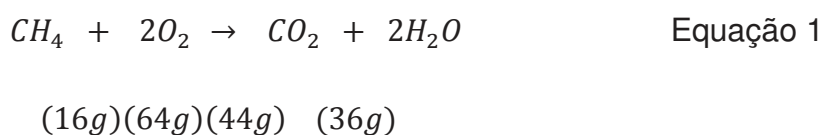
Gasolina	Gasóleo	Biodiesel	GPL	Eletricidade	Lenha	Pellets madeira
0,61 litros	0,7 litros	0,55 litros	0,45 Kg	6,9 kWh	1,538 Kg	0,304 g

Fonte: Silva (2009)

4.4 Quantificação do volume de biogás produzido

4.4.1 Produção teórica do biogás

É possível estimar a produção teórica de biogás a partir da produção final de metano. A produção teórica de metano pode ser derivada da estequiometria da digestão anaeróbia onde 1 mol de CH_4 requer 2 moles de oxigênio para sua completa oxidação a gás carbônico e água (CHERNICHARO, 1997), conforme a Equação 1:



Portanto, 1 mol de metano produzido corresponde à remoção de 64 gramas de DQO (correspondido pelo O_2). Chernicharo (1997) apresenta a expressão geral que determina a produção teórica de metano por grama de DQO, conforme mostrada na Equação 2.

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V_{CH_4} : volume de metano produzido, em litros;

DQO_{CH_4} : carga de DQO removida no reator e convertida em metano, em $gDQO$;

$K(t)$: fator de correção para temperatura de operação do reator, em $gDQO/l$.

O fator de correção para temperatura é dado pela equação:

$$K(t) = \frac{p \times K}{R \times (273+t)} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

p : pressão atmosférica igual a 1 atm;

K : DQO correspondente a 1 mol de CH_4 , igual a 64 $gDQO/mol$;

R : Constante universal dos gases, igual a $0,08206 \text{ atm.L/mol.K}$;

t : Temperatura de operação do reator, em $^{\circ}\text{C}$;

Nas condições normais de temperatura e pressão (0°C e 1 atm), a produção teórica corresponde a 350 ml de metano para cada grama de DQO removida.

4.4.2 Medição do biogás

O biogás produzido no reator UASB pode ser medido por meio da utilização de alguns equipamentos. Chernicharo(1997) cita a medição do biogás realizada por deslocamento de água; por meio de mini-manômetros; ou de transdutores de pressão. Segundo Prado (2006), a quantificação do biogás, em qualquer sistema, pode ser também verificada utilizando-se tanto medidores analógicos como digitais.

A escolha do medidor vai depender da vazão estimada de biogás no processo. A medida por deslocamento de água, utilizando reservatórios de água e gás (gasômetros), é um método simples, mas apresenta o inconveniente de ser menos preciso do que métodos utilizando medidores mecânicos e ou eletrônicos (PRADO, 2006).

Chernicharo (1997) e Campos (1999) utilizaram um sistema de medição com manômetros capilares e registros analógicos, os quais minimizam os efeitos das perdas de carga que ocorrem nas medições por deslocamento de água.

Na ETE-UFES já foram realizadas algumas pesquisas com monitoramento do biogás produzido, dentre estas, Cribari (2004) e Delazare (2004) utilizaram um medidor do tipo turbina, instalado na tubulação de biogás, enquanto Veronez (2001) utilizou um medidor eletrônico de emissão de sinais na tubulação de coleta de biogás.

4.5 Perdas de Metano

Na prática, a produção de metano é bem menor que aquela prevista na produção teórica calculada nas condições estequiométricas (Equações 2 e 3). Segundo Veronez (2001), isso é justificado pelas perdas de metano, podendo ocorrer devido à dissolução deste gás no efluente do reator UASB ou à transferência deste gás da

superfície da água no reator para a atmosfera. Esta última perda dependerá do tamanho da superfície e da presença ou não de uma cobertura (hermética) da superfície do reator.

Souza (2010) cita os estudos de Agrawal et al. (1997) e de Singh & Viraraghavan (1998) que calcularam a perda de metano no efluente de reatores UASB, quantificando, respectivamente, perdas de 50% e 60% da produção teórica. Formigoni & Perovano (2011) citam o estudo dos autores Keller & Hartley (2003), que chegaram a valores de perda de metano de ordem de 14%. Veronez (2001) faz menção de Van Haandel & Lettinga (1994), que apontam perdas práticas de metano em reatores UASB na faixa de 20 a 50%. Souza *et al.* (2009, apud MIKI, 2010) apresentou uma perda de metano no efluente líquido ainda mais precisa, correspondente a 44,8% da produção total de gás gerado (dissolvido + biogás).

Observa-se que as perdas de metano podem alcançar valores significativos, o que reduz o potencial energético do biogás previsto no cálculo de estimativa. Visto isso, é de grande importância considerar as perdas de metano no cálculo da produção volumétrica de biogás para fornecer um resultado coerente sobre o seu verdadeiro potencial energético.

4.6 Balanço de Massa

De acordo com von Sperling (2005), o balanço de massa é uma descrição quantitativa de todas as matérias que entram, saem e se acumulam em sistemas com limites físicos definidos. Este processo é baseado na lei da conservação de massa, isto é, a massa nunca é criada ou destruída (INCROPERA & DEWITT, 1992). Neste contexto, a análise do balanço de massa dentro de um reator UASB deve levar em consideração os materiais que entram, os materiais que saem, os materiais que são gerados, os materiais que são consumidos e os materiais que são acumulados no volume analisado. Onde:

$$\text{Acumulação} = \text{Afluente} - \text{Efluente} + \text{Geração} - \text{Consumo}$$

O processo anaeróbio de degradação de matéria orgânica segundo van Haandel & Lettinga (1994), pode ser dividido em quatro opções:

- 1- Conversão em lodo (anabolismo ou absorção);
- 2- Conversão em metano (catabolismo fermentativo);
- 3- Mineralização através da oxidação (catabolismo oxidativo);
- 4- Permanência na fase líquida (descarga no efluente)

É importante ressaltar que os cálculos de balanço de massa devem ser efetuados quanto à DQO e não à DBO_5 . O balanço de massas da matéria orgânica quando feito a partir da medida em DBO traz várias distorções, basicamente por dois motivos: a medida de DBO tem um erro analítico bem maior na sua determinação do que a DQO e o cálculo do balanço de massa pela DBO não leva em consideração a formação de resíduo endógeno (material orgânico não biodegradável), vindo da biodegradação celular das bactérias do lodo ativo (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

A Figura 4 esquematiza o balanço de massa em termos de DQO, mostrando o que entra (afluente), o que sai (efluente) e o que é transformado (biogás e lodo).

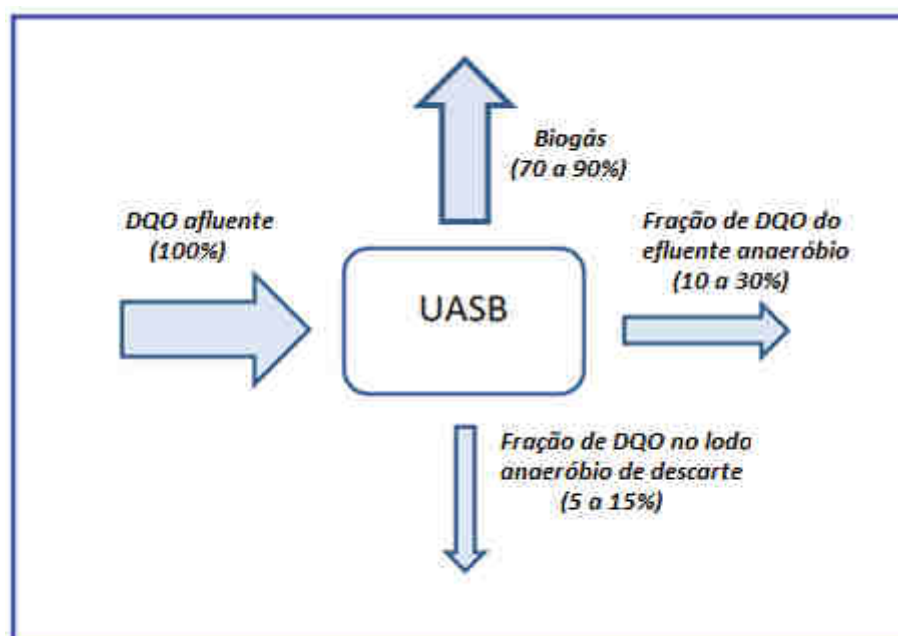


Figura 4: Balanço de massa do reator UASB

Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997)

O balanço de massa dos reatores UASB apresenta dificuldade de “fechar”. Isso se deve às perdas de DQO sob a forma de metano aliada a erros experimentais e condições operacionais que geralmente não são estacionárias.

4.7 Aplicações do biogás

O biogás pode ser utilizado em praticamente todas as aplicações desenvolvidas para o gás natural. Para algumas aplicações, entretanto, o biogás deve ser tratado, pois existem diferenças consideráveis entre os requerimentos para as aplicações estacionárias do biogás e como combustível ou para a distribuição em tubulações (ICLEI, 2010).

Há duas maneiras principais de aproveitamento do biogás produzido em ETE, uma consiste na queima direta do gás para geração de calor enquanto a outra consiste na sua conversão em eletricidade. Essas duas formas de energia podem ser aplicadas em operações da própria ETE. O biogás ainda pode ser utilizado como combustível veicular, principal ou auxiliar, em sistemas de iluminação e aquecimento a gás e ainda pode ser injetado, após purificação, na rede de gás natural para outros fins (ICLEI, 2010).

Nos países industrializados, caldeiras estão presentes apenas em um pequeno número de plantas onde o biogás é utilizado como combustível sem cogeração. Em diversas aplicações industriais, o biogás é utilizado para a produção de vapor. A queima do biogás em caldeiras é uma tecnologia bem estabelecida e confiável, e existem poucas restrições em relação à qualidade do biogás (ZANETTE, 2010)

Nos grandes centros urbanos, por exemplo, o biogás produzido durante a digestão anaeróbia pode ser aproveitado na própria estação de tratamento, sendo utilizado na forma direta como fonte de carbono para desnitrificação, ou na forma indireta como suprimento energético para aeração do sistema aeróbio ou na secagem e higienização do próprio lodo gerado na ETE, o que acarretaria uma diminuição dos custos operacionais da mesma (DELAZARE, 2004)

As principais vantagens e os atuais empecilhos à utilização do biogás em ETEs, segundo Salomon e Lora (2005), encontram-se descritos no Quadro 4.

Quadro 4: Vantagens e empecilhos à utilização do biogás em ETEs

Vantagens	Empecilhos
<ul style="list-style-type: none"> • Geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de fonte 	<ul style="list-style-type: none"> • Escassez de tecnologias nacionais de geração de energia a partir do biogás;

renovável; <ul style="list-style-type: none"> • Redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária, e, em decorrência, de custos; • Possibilidade de processos de cogeração; • Redução das emissões de metano para a atmosfera; • Créditos de carbono; • Maior controle de mau de odores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Em geral, a utilização do biogás demanda a retirada de constituintes, como o H_2S; • Ausência de casos reais que comprovem a viabilidade econômica; • Falta de fiscalização e penalidades por possíveis danos ambientais; • O biogás é um gás leve e de baixa densidade, de difícil liquefação, o que dificulta seu transporte e armazenamento.
---	---

Fonte: Adaptado de Salomon e Lora (2005)

4.7.1 Utilização do potencial térmico do biogás

O biogás pode ser utilizado para gerar energia térmica, através da sua queima direta por meio de aquecedores, fogões, esquentadores ou caldeiras. O “Manual para Aproveitamento de Biogás” (2010) apresenta como possíveis usos do biogás, como fonte de energia calorífica, o uso direto em aquecedores a gás para produção de água quente para condicionamento ambiental ou calor de processo, secagem de grãos em propriedades rurais, secagem de lodo em ETEs, iluminação a gás, tratamento de chorume, entre outros.

No caso do biogás proveniente dos reatores UASB das estações de tratamento de esgoto, destaca-se a sua utilização como fonte de energia térmica para consumo próprio, como nos processos de secagem e higienização do lodo (CASSINI, 2003).

4.7.1.1 Aplicação da energia térmica do biogás na secagem e higienização do lodo

O calor fornecido pelo biogás pode ser aplicado no processamento de secagem e higienização do lodo de esgoto. Este aproveitamento do biogás na própria estação, além de evitar o lançamento de gases causadores de efeito estufa (como o metano e o dióxido de carbono) para a atmosfera, proporciona uma redução dos custos operacionais da ETE (CASSINI, 2003).

O lodo de ETE, o qual é composto pelos subprodutos sólidos do tratamento, necessita de uma correta gestão para que todo o sistema de tratamento de efluentes seja considerado adequado, visto que a disposição final do lodo passou a ser

exigida na definição técnica nos processos de licenciamento por órgãos ambientais de alguns estados. A Tabela 5 apresenta as etapas de gerenciamento do lodo e seus objetivos.

Tabela 5: 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: Mendes (2008).

A utilização do biogás como fonte auxiliar aquecedora e mantenedora de temperaturas suficientes para a completa higienização do lodo surge como uma boa solução no tratamento do lodo, principalmente pelo aproveitamento do biogás gerado nos sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto, acarretando em uma economia de consumo de energia gerada em todo o processo. Essa tecnologia que utiliza o aproveitamento energético do biogás para a secagem e higienização do lodo é mais simples, menos onerosos e com temperaturas mais baixas que outras tecnologias, porém, suficientes para a completa desinfecção do lodo (CASSINI, 2003).

Andreoli *et al.* (2002) apresentaram um trabalho referente ao aproveitamento do biogás como energia térmica na desidratação e higienização do lodo de esgoto em leito de secagem, por meio de injeção subsuperficial de calor pela queima do biogás produzido na própria estação de tratamento. Verificou-se uma eficiente remoção do teor de sólidos e uma total inviabilização de ovos de helmintos, garantindo a segurança sanitária do produto para posterior reciclagem na agricultura.

4.7.2 Conversão para energia elétrica

Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. Entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso da conversão do biogás em energia elétrica, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador, que a converte em energia elétrica (COELHO *et al.*, 2006).

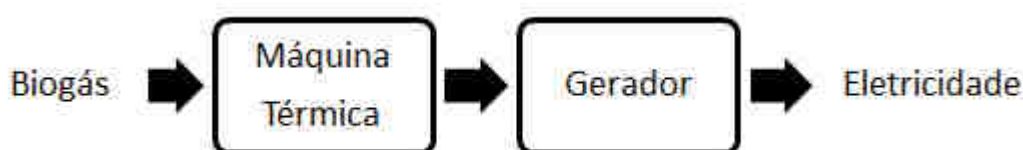


Figura 5: Esquema da conversão do biogás em energia elétrica

Nos processos de combustão controlada para tal aplicação, destacam-se as seguintes tecnologias disponíveis comercialmente: turbinas a gás, microturbinas e grupos geradores de combustão interna.

4.7.2.1 Turbina a gás

As turbinas a gás são equipamentos térmicos que realizam a conversão da energia de um combustível em potência. São geralmente constituídas por um compressor de ar, uma câmara de combustão e a turbina propriamente dita.

As funções de cada componente das turbinas a gás são descritas por Monte (2010):

- Compressor – tem a função de aumentar a pressão do ar admitindo para a combustão
- Câmara de combustão – é o local onde ocorre a combustão da mistura ar-combustível
- Turbina – equipamento que converte a energia liberada pela combustão em potência mecânica, sendo composta por um rotor doado de pás ligadas a um eixo que gira sobre um conjunto de mancais

No compressor, o ar sofre elevação de sua pressão e temperatura e em seguida é injetado na câmara de combustão, fornecendo oxigênio para a queima do combustível (neste caso, o biogás). Os gases de combustão resultante desta queima são expandidos na turbina transformando sua energia térmica em energia mecânica. O eixo da turbina é conectado ao compressor e ao gerador elétrico, de maneira que a potência extraída do eixo da turbina aciona tanto o compressor como o gerador de eletricidade, conforme Figura 6.

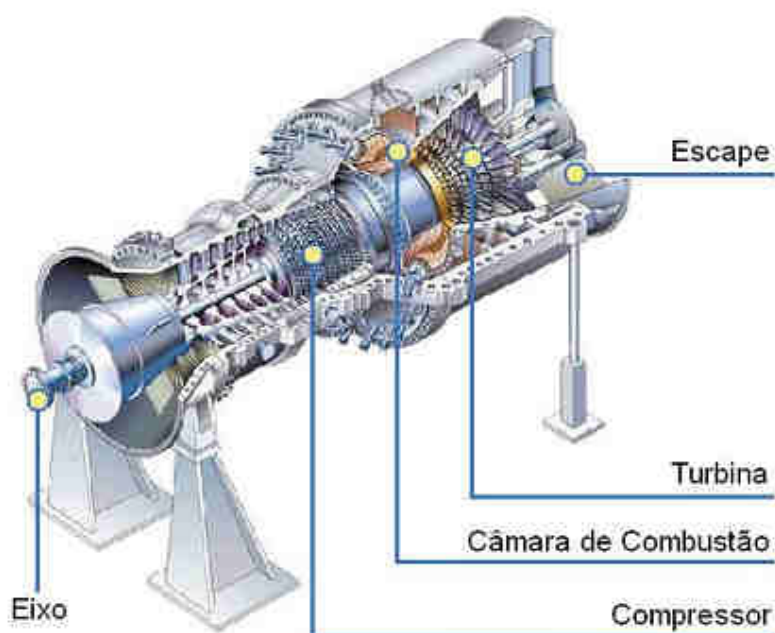


Figura 6: Detalhes construtivos de uma turbina a gás
 Fonte: França Junior (2008)

4.7.2.2 Microturbina a gás

As microturbinas são sistemas reduzidos compostos por: compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico. São denominadas microturbinas porque o gerador elétrico necessita ter potência inferior a 250 KW e por apresentarem o mesmo princípio de funcionamento que as turbinas a gás, porém de menor porte.

Segundo França Junior (2008), a maioria das microturbinas funciona a gás natural, mas pode-se utilizar, também, gasolina, óleo combustível, álcool, querosene e propano. A Figura 7 apresenta os componentes da microturbina.

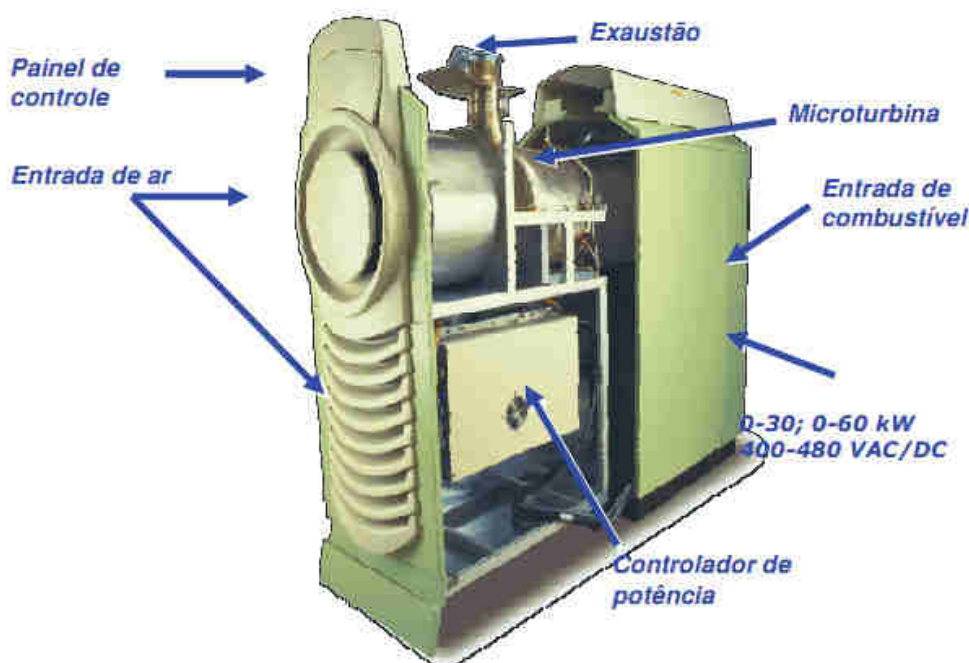


Figura 7: Componentes da microturbina
 Fonte: Monteiro (2004, apud Pecora, 2006)

4.7.2.3 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna são máquinas térmicas onde a energia química do combustível se transforma em energia mecânica, por meio da combustão da mistura de ar e combustível. Os motores podem ser classificados pela tipologia, podendo ser motores de ignição por centelha ou Otto e de ignição por compressão ou Diesel, e pelo tempo de ignição, de dois ou quatro tempos (ICLEI, 2010).

Segundo Salomon (2007), por serem máquinas simples, robustas e flexíveis, os motores de combustão interna são os equipamentos mais utilizados para a queima do biogás. O motor ciclo Otto é o mais recomendável devido ao maior rendimento elétrico e menor custo, quando comparado às outras tecnologias. A Figura 8 apresenta uma foto de um motor de combustão interna.

Nos motores de ciclo Otto, a mistura ar/combustível é inflamada por meio de uma ignição por faísca dentro da câmara de combustão. Já nos motores Diesel (Ciclo Diesel), o ar admitido na câmara de combustão é comprimido até uma pressão suficiente para que ocorra a combustão espontânea quando o combustível for

injetado. A geração de energia elétrica é realizada pelo grupo gerador, acoplado diretamente ao motor (ICLEI, 2010).

Alguns estudos mostram que a eficiência do motor varia drasticamente de acordo com o teor de metano no biogás. Salomon (2007) afirma que os motores de combustão interna mais atuais já vêm preparados para queimar o biogás com diferentes teores de metano, dióxido de carbono e ácido sulfídrico.



Figura 8: Foto de um motor de combustão interna operando num sistema de cogeração
Fonte: França Junior (2006)

4.8 Purificação do biogás

Existem algumas substâncias presentes no biogás que podem comprometer sua aplicação, como a água, dióxido de carbono, ácido sulfídrico, entre outros. O biogás produzido nos reatores UASB deve, portanto, passar por um tratamento de purificação, a fim de aumentar o seu poder calorífico, padronizar o gás produzido e atender as especificações necessárias para cada aplicação (geradores, caldeiras, veículos, etc.)(ICLEI, 2010).

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, tornam o processo de queima menos eficiente, visto que essas substâncias misturam-se com o combustível e absorvem parte da energia gerada. A presença de ácido sulfídrico pode acarretar em uma combustão incompleta, falha de alimentação, perda de potência e corrosão precoce, diminuindo tanto o rendimento quanto a vida útil do motor térmico. A umidade pode comprometer o bom funcionamento das

partes internas da microturbina (bicos injetores, câmara de combustão, paletas da turbina), além de causar a condensação em dutos, formação de soluções ácidas e problemas com a corrosão. Além destas substâncias, ainda há os problemas com corrosões, incrustações e erosão dos equipamentos devido à presença de hidrocarbonetos pesados e siloxanos (COSTA, 2006; SALOMON, 2007).

4.8.1 Substâncias que devem ser removidas de acordo com a aplicação do biogás

Existem diferentes alternativas de purificação do biogás, devendo ser definida a mais adequada à aplicação energética desejável. A utilização do biogás em unidades de cogeração é o caso típico onde deve haver a remoção dos contaminantes como H_2S , hidrocarbonetos halogenados e siloxinas. A maioria dos fabricantes de turbina a gás especifica limites máximos para essas substâncias (VELÁZQUEZ *et al.*, 2003).

Segundo Zanette (2009) para a aplicação do biogás tanto no ramo automotivo como na rede de gás natural, deve-se remover também o CO_2 . Existem diversas tecnologias disponíveis para a purificação do biogás com vistas a atender as especificações de combustível veicular ou do gás natural. Na remoção de CO_2 , pequenas quantidades de metano são removidas, acarretando em perdas, as quais devem ser minimizadas por razões econômicas e ambientais, já que o metano é um gás do efeito estufa 21 vezes mais potente que o CO_2 .

A Tabela 6 apresenta um resumo das principais substâncias que devem ser removidas do biogás de acordo com sua utilização.

Tabela 6: Necessidade de remoção de compostos gasosos de acordo com a utilização do biogás

Aplicação	H_2S	CO_2	H_2O
Microturbinas	Sim	Não	Sim
Motores Combustão Interna	Sim	Não	Sim
Caldeiras	<1000 ppm	Não	Não

Fogões	Sim	Não	Não
Combustível veicular	Sim	Recomendável	Sim
Rede de gás natural	Sim	Sim	Sim

Fonte: Littig (2011)

4.8.2 Técnicas de remoção de impurezas do biogás

Diversos mecanismos básicos estão envolvidos para proporcionar a separação seletiva de componentes gasosos, entre eles estão a absorção física ou química, adsorção em uma superfície sólida, separação em membranas, separação criogênica e remoção de H_2S pelo óxido de ferro. Para o tratamento do biogás, os métodos de absorção física e química são geralmente utilizados por serem efetivos mesmo para as baixas vazões encontradas normalmente nas plantas de biogás. Além disso, o método é menos complicado, requer uma infraestrutura mais simples e é custo-efetivo (ZANETTE, 2009; SILVA 2009).

- Absorção

Na absorção química, tem-se a ocorrência de uma reação química entre o gás absorvido e o líquido solvente, podendo este líquido ser ou não regenerado. Na absorção física, o gás é simplesmente dissolvido no solvente líquido, sem sofrer reação química (FRARE *et al.*, 2009). A técnica de absorção é mais conhecida para a purificação do biogás. O método mais simples utiliza a água como solvente. Em todos os casos, o biogás bruto é injetado no fundo de uma coluna e o solvente entra em contracorrente, encarregando-se de eliminar as impurezas, as quais serão coletadas no fundo da torre. (DELAZARE, 2004). Quando se utiliza a água como solvente, o biogás que sai no topo da coluna está enriquecido em metano, porém saturado com água. Para reduzir a concentração de vapor d'água o biogás deve ser seco (ZANETTE, 2009).

- Adsorção em uma superfície sólida

A adsorção sobre um sólido consiste em fixar as moléculas das substâncias indesejáveis (H_2S , CO_2 , H_2O) sobre um apoio desejado. Os adsorventes têm toda uma superfície porosa. A seletividade da adsorção pode ser obtida com diferentes tamanhos de poros (DELAZARE, 2004). Segundo Zanette (2009), para separar o

CO₂ do biogás utilizam-se materiais adsorventes como carvão ativado ou peneiras moleculares.

- Separação em membranas

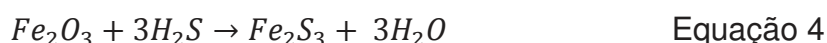
A separação por membranas é obtida pela diferença de permeabilidade dos gases através de uma membrana. Alguns métodos permitem eliminar simultaneamente o gás carbônico, o ácido sulfídrico e a água, mas, na maioria dos casos, vários tipos de tratamento complementar são necessários (SILVA, 2009).

- Separação criogênica

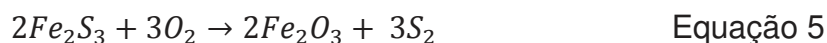
Este método consiste no resfriamento do biogás utilizando-se pressão elevada, a fim de obter as impurezas, como H₂O e CO₂, na forma líquida, permitindo separá-los do biogás.

- Depuração do H₂S pelo óxido de ferro

Esta técnica consiste em fazer o biogás circular através de uma massa depuradora de óxido de ferro. Conforme vai circulando, o biogás vai perdendo o gás sulfídrico, que fica retido ao reagir com o óxido de ferro. Esta técnica é barata e simples de ser aplicada (PRATI, 2010). A reação química é apresentada na Equação 4:



A regeneração do óxido de ferro é possível, como apresentado pela reação química a seguir (Equação 5). No entanto, segundo Zanette (2009), essa regeneração é delicada de realizar.



Alves (2000) ainda apresenta um quadro com as principais técnicas e seus respectivos materiais utilizados para remoção de impurezas presentes no biogás, como água, hidrocarbonetos, CO₂, H₂S e siloxina (Quadro 5).

Quadro 5: Técnicas de remoção de impurezas do biogás

Impureza	Método	Detalhes
Água	Adsorção	Sílica gel

		Peneira molecular
		Alumina
	Absorção	Etileno glicol (Temperatura -6,7 °C)
	Refrigeração	Selexol Resfriamento a 2º C
Hidrocarbonetos	Adsorção	Carvão Ativado
	Absorção	Óleo Leve
		Etileno glicol
		Selexol (Temperatura entre -6,7 °C e -33,9°C)
	Combinação	Refrigeração com Etileno glicol e adsorção em carvão ativado
CO ₂ e H ₂ S	Absorção	Solventes Orgânicos
		Selexol
		Flúor
		Rectisol
		Soluções de sais alcalinos
		Potássio quente e potássio quente inibido
		Alcanolaminas
		Mono, di – tri – etanol amina
		Deglicolamina
		Ucarsol-CR
	Adsorção	Peneiras moleculares Carvão ativado
	Separação por membranas	Membrana de fibra oca
Siloxina	Adsorção	Carvão ativado

Fonte: Adaptado de Alves (2000)

5 METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho visou apresentar a caracterização qualitativa do biogás gerado no reator UASB da ETE-UFES (realizada na pesquisa de Delazare em 2004), quantificar o seu potencial energético e apresentar as etapas que o biogás deve seguir após a sua coleta no reator UASB, assim como as

possíveis técnicas e equipamentos a serem utilizadas, para realizar o seu aproveitamento energético.

O planejamento do trabalho foi desenvolvido em três etapas:

- Etapa 1: Caracterização quali-quantitativa do biogás produzido na ETE-UFES
- Etapa 2: Cálculo da energia disponível no biogás produzido na ETE-UFES
- Etapa 3: Levantamento dos procedimentos para a utilização energética do biogás gerados em ETEs

5.1 Etapa 1: Caracterização quali-quantitativa do biogás produzido na ETE-UFES

A caracterização quali-quantitativa do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES já foi realizada experimentalmente por Delazare (2004) e, portanto, os mesmos dados gerados nesse estudo serão utilizados no desenvolvimento do trabalho presente. A seguir será apresentada a metodologia adotada por essa autora na realização da caracterização do biogás.

5.1.1 Monitoramento

A parte experimental desta pesquisa, proposta por Delazare (2004), foi realizada na Estação de Tratamento de esgoto Experimental da Universidade Federal do Espírito Santo, localizada no Campus de Goiabeiras, na região da Grande Vitória – ES.

O monitoramento foi realizado entre outubro de 2002 e março de 2003, completando um período de 6 meses. Os parâmetros relevantes a este trabalho são: vazão de esgoto, concentração de DQO, vazão do biogás e a composição do biogás, bruto e lavado.

A Estação de Tratamento de Esgoto da Universidade Federal do Espírito Santo foi projetada para atender uma população de 1000 habitantes, no entanto, a estação recebia esgoto doméstico de aproximadamente 500 habitantes. A ETE era composta por uma estação elevatória (6,5 m³), um reator anaeróbio do tipo UASB (26,5 m³), 4

biofiltros aerados submersos (12 m^3) e um leito de secagem com duas células (10 m^3) (DELAZARE, 2004).

O esgoto bruto, proveniente do Bairro de Jardim da Penha, adjacente à Universidade, era recalcado da elevatória desse bairro, operada pela Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN), para a elevatória da ETE-UFES. Ao chegar na elevatória da UFES, o esgoto era gradeado, a fim de remover sólidos grosseiros e bombeado para a caixa de areia, situada logo a montante do reator UASB.

Em seguida, o esgoto alimentava o reator UASB, onde ocorria o tratamento primário, sendo o tempo de detenção dentro desse reator de 8 horas, que por sua vez fornecia a alimentação da etapa aeróbia do tratamento, composta por biofiltros aerados submersos, promovendo um tratamento secundário. O biofiltro terciário, por sua vez, recebia o esgoto efluente de um dos biofiltros secundários, promovendo um tratamento terciário a esse afluente. Desse modo, o efluente dessa ETE era proveniente dos biofiltros secundários e do biofiltro terciário. O efluente final era encaminhado para um reservatório e depois para destinação final (VERONEZ, 2001 e DELAZARE, 2004).



Figura 9: Estação experimental de tratamento de esgoto da UFES.

Fonte: Arquivo das autoras.

5.1.2 Fase Líquida

A caracterização da fase líquida consistiu na medição da vazão de esgoto que chegava à ETE e na análise de DQO.

Medição da vazão de esgoto

A vazão de esgoto que a ETE-UFES operou foi medida pelo método volumétrico, que consiste em determinar a vazão medindo-se o tempo necessário para encher um reservatório de volume conhecido. Foi utilizado um balde como reservatório e um cronômetro para determinar o tempo necessário para o esgoto encher o balde.

Análise de DQO

Delazare (2004) realizou o monitoramento da DQO, a partir da coleta de amostras em três pontos: no esgoto bruto, na entrada e saída do reator UASB (Figura 10). As amostras coletadas foram transportadas para o laboratório de saneamento Núcleo Água da UFES, onde se realizaram as análises de DQO de acordo com as metodologias descritas pelo STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 19th Edition 1995.

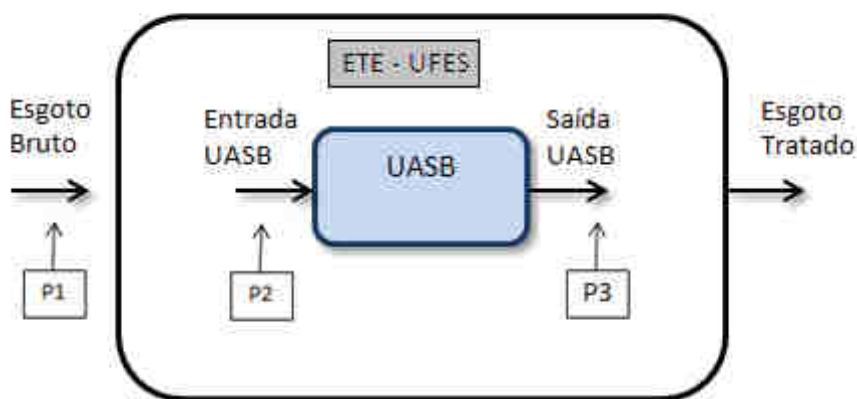


Figura 10: Plano de amostragem da análise de DQO

5.1.3 Fase Gasosa

A caracterização da fase gasosa consiste na análise quali-quantitativa do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. A análise quantitativa consiste na medição da volume diário de biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES, enquanto que

a análise qualitativa consiste na determinação da composição do biogás (bruto e purificado).

Medição da produção volumétrica de biogás

Delazare (2004) obteve o valor médio da produção volumétrica diária do biogás, proveniente do reator UASB da ETE-UFES, através da utilização de um medidor da marca Ritter (modelo TG 5), instalado na tubulação de biogás, o qual apresentava uma leitura do volume de biogás produzido por minuto. Estes dados foram armazenados em micro computador por meio de uma placa de aquisição de dados que emitia como saída um arquivo do tipo “texto”, o qual foi convertido para arquivo “excel”.



Figura 11: Medidor de vazão
Fonte: Delazare (2004).

Composição do biogás

Para a caracterização qualitativa do biogás foram coletadas amostras do biogás bruto e lavado por meio de uma pequena perfuração na tubulação de biogás com auxílio de uma seringa. Foram tomados dois pontos de amostragem, P1 e P2 (Figura 12), sendo P1 um ponto de amostra de biogás bruto localizado entre o UASB e o selo hídrico e P2 um ponto de amostra de biogás lavado, localizado entre o cilindro com palha de aço e o reservatório de metano (Figura 15). Portanto, foram tomadas duas amostras por coleta. Ao todo foram realizadas oito coletas, ou seja, um total de 16 amostras.

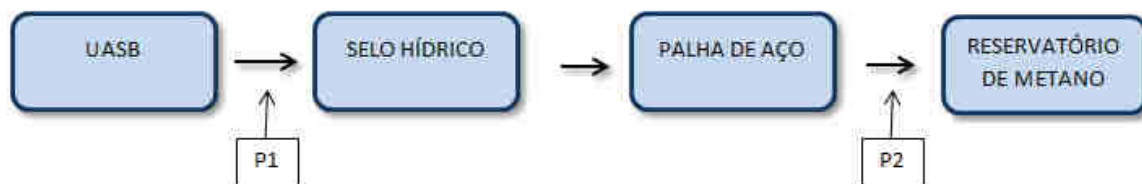


Figura 12: Plano de amostragem da caracterização qualitativa do biogás

As análises do biogás, tanto bruto quanto lavado, foram realizadas em um cromatógrafo gasoso, marca Hewlett Packard HP 6890 series.

Técnicas de purificação do biogás

O selo hídrico era composto de uma solução de lavagem, saturada de hidróxido de sódio (NaOH), com pH aproximadamente igual a 13. O objetivo desta solução era a sua reação com o sulfeto contido no biogás, formando um sal e liberando um biogás puro e lavado, composto apenas por metano.

Conectado ao selo hídrico por uma mangueira, na saída deste, havia um tubo cilíndrico transparente de 100 mm de diâmetro e altura de 1 m, que continha palha de aço. A finalidade deste tubo cilindro era garantir a remoção total de sulfeto.

O selo hídrico e o cilindro com palha de aço podem ser visualizados na Figura 13 e Figura 14.

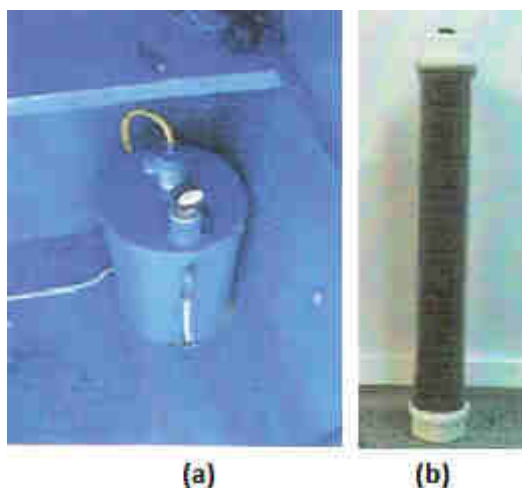


Figura 13: (a) - Selo hídrico; (b) - cilindro com palha de aço

Fonte: Delazare (2004).

Para analisar a eficiência de remoção do método de lavagem, foram realizadas amostras de biogás após a passagem do biogás pelo selo hídrico e pelo cilindro de palha de aço.



Figura 14: Aparato de lavagem = Selo hídrico + Cilindro com palha de aço

Fonte: Delazare (2004).

O gás purificado, enriquecido de metano, foi armazenado em um reservatório de lona sintética, da marca São Paulo Alpargatas, com volume útil de 8 m³, como pode ser observado na Figura 15.



Figura 15: Reservatório de Metano

Fonte: Delazare (2004).

5.2 Etapa 2: Cálculo da energia disponível no biogás produzido na ETE-UFES

Cálculo da energia térmica

A energia disponível no biogás gerado no reator UASB é determinada pela Equação 6:

$$E_t = Q_{biogás} \cdot PCI_{biogás} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

E_t : Energia térmica disponível no biogás (kcal/dia);

$Q_{biogás}$: Vazão média do biogás medida (m³/dia);

$PCI_{biogás}$: Poder calorífico inferior do biogás (kcal/m³).

Conforme dito anteriormente, a vazão média do biogás foi obtida experimentalmente por Delazare (2004) através da utilização de um medidor instalado na tubulação de biogás. O poder calorífico inferior do biogás, apresentado na Tabela 2, varia de acordo com o percentual de metano e CO₂, sendo que quanto maior o teor de metano presente no biogás, maior será o poder calorífico deste último. No entanto, a adoção de um valor de poder calorífico do biogás, conforme apresentado por Costa (2006), pode não gerar um resultado muito confiável, uma vez que existem outros componentes, além do CO₂ e metano, presentes no biogás lavado, como os gases oxigênio e nitrogênio.

Visto isso, propõe-se calcular a energia térmica do biogás por meio do cálculo da energia gerada pelo gás metano presente na composição do biogás lavado, uma vez que o metano é a substância responsável pela geração de energia. Portanto, a energia disponível no biogás gerado no reator UASB é equivalente à energia produzida pelo gás metano. No cálculo da energia gerada utiliza-se a vazão do metano (obtida através do produto da vazão do biogás multiplicado pelo teor de metano) e o poder calorífico inferior do metano, conforme a Equação 7:

$$E_t = (Q_{biogás} \cdot t_{CH_4}) \cdot PCI_{CH_4} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

t_{CH_4} : Teor de metano na composição do biogás lavado;

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior do metano (kcal/m³).

Será utilizado no cálculo o poder calorífico inferior do metano igual a 8500 kcal/m³, conforme apresentado na Tabela 3.

Cálculo da energia elétrica

A partir da energia térmica calculada no item anterior, é possível calcular a energia elétrica que o biogás pode gerar, que vai depender da eficiência da tecnologia de conversão e do gerador utilizados. Primeiramente deve-se calcular a potência elétrica do biogás, conforme a Equação 8:

$$PE_{biogás} = \frac{E_t \cdot 4,184 \cdot n_{tec} \cdot n_{gerador}}{86.400} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$PE_{biogás}$: Potência elétrica do biogás (kW);

4,1848: Fator de conversão de “kcal” para “kJ”;

n_{tec} : Eficiência da tecnologia de conversão (turbina, microturbina ou motor de combustão interna);

$n_{gerador}$: Rendimento do gerador;

86.400: Fator de conversão de dias para segundos.

Com o valor encontrado da potência elétrica do biogás, calcula-se então a energia elétrica gerada a partir da tecnologia de conversão.

$$E_e = PE_{biogás} \cdot T_{Operação}$$

Onde:

E_e : Energia elétrica gerada (kWh/dia);

$T_{\text{operação}}$: Tempo de operação do motor (h/dia)

Tendo conhecimento do número de habitantes que gera esgoto para a ETE-UFES, será calculada também a energia produzida diariamente *per capita*.

5.3 Etapa 3: Levantamento dos procedimentos para a utilização energética do biogás gerados em ETEs

Com a finalidade de auxiliar trabalhos futuros referentes ao aproveitamento energético do biogás de ETEs, serão apresentados os procedimentos necessários para esta aplicação. Isso foi realizado por meio de pesquisa bibliográfica, da qual foram levantadas as metodologias adotadas em projetos e pesquisas desenvolvidos nessa área.

Na roteirização do aproveitamento energético do biogás, após a sua captação no reator UASB, é necessária a purificação, o armazenamento e a conversão energética, antes da sua aplicação propriamente dita. Nestas etapas são utilizadas uma série de procedimentos e equipamentos. Portanto, foi feito um levantamento dos equipamentos comumente utilizados em cada etapa.

Determinou-se realizar uma revisão bibliográfica de vários projetos já desenvolvidos com a finalidade de apresentar uma maior variedade de opções de procedimentos que podem ser utilizados para o aproveitamento energético do biogás.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização quantitativa do biogás da ETE-UFES

A caracterização quantitativa do biogás do ETE-UFES, realizada por Delazare(2004), obteve como resultados a medição da vazão de esgoto, concentração de DQO e vazão de biogás, os quais serão apresentados nesta secção.

As Figura 16 e Figura 17 mostram as vazões médias de esgoto, obtidas pelo método volumétrico, e as vazões médias diárias de biogás produzido no reator UASB,

obtidas pelo medidor de gás (instalado na tubulação de biogás no período de monitoramento).

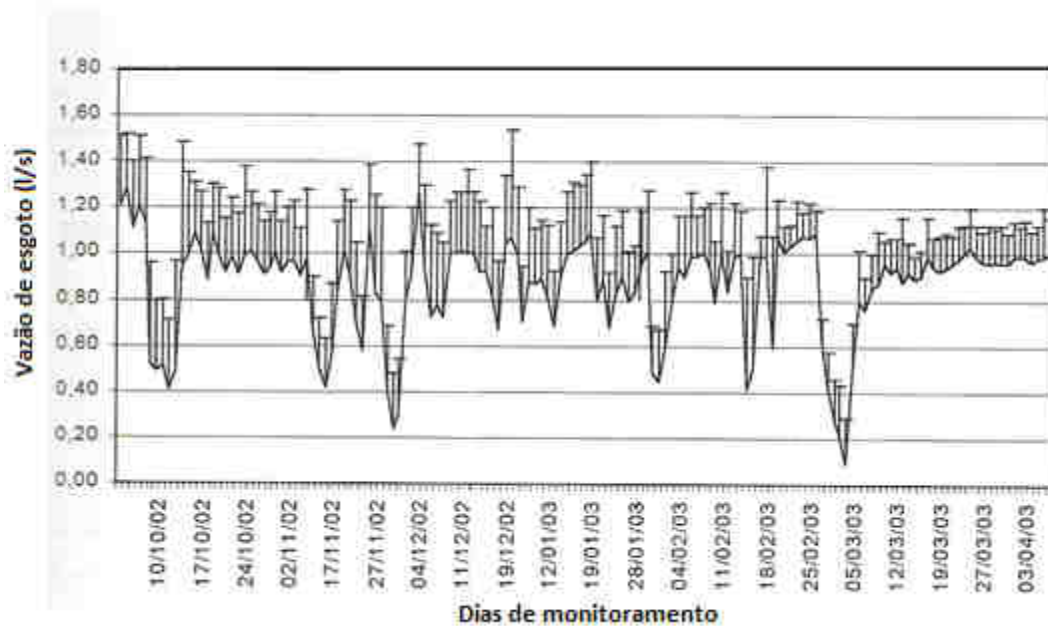


Figura 16: Monitoramento da Vazão Média Diária de Esgoto

Fonte: Delazare (2004).

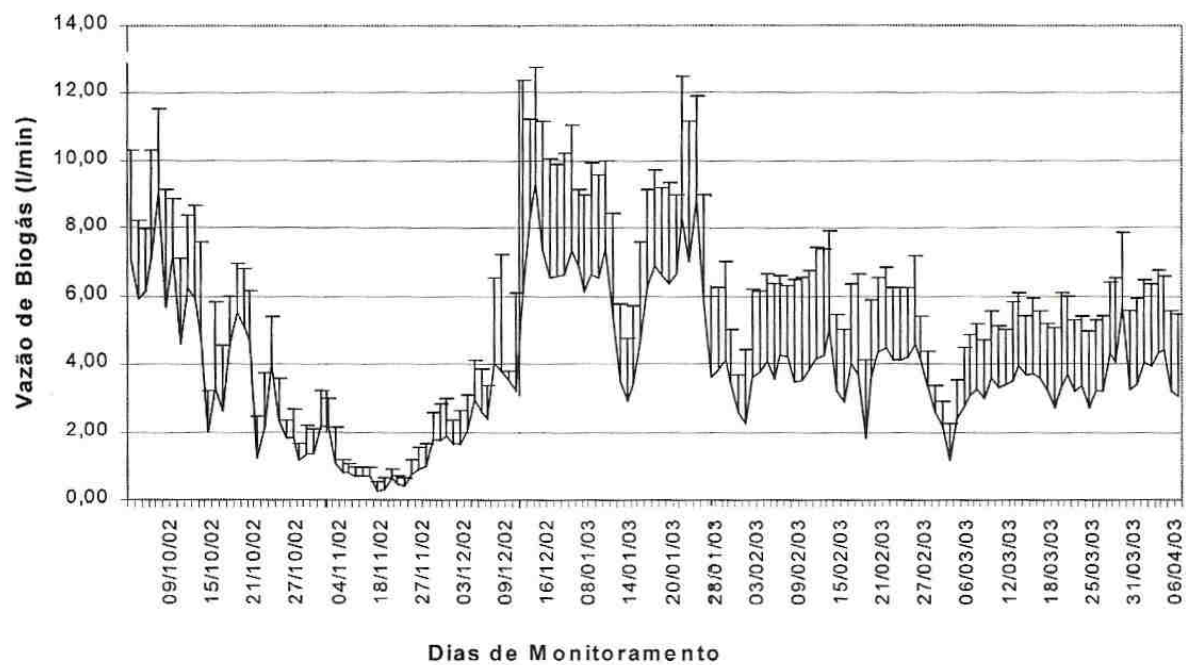


Figura 17: Monitoramento da Vazão Média Diária de Biogás Produzido no Reator UASB

Fonte: Delazare (2004).

Os resultados das análises de DQO das amostras coletadas no esgoto bruto, na entrada e saída do reator UASB são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Concentração da DQO no esgoto bruto, na entrada e saída do reator UASB

	DQO (mg/l)		
	Esgoto bruto	Entrada UASB	Saída UASB
N° amostras	13	13	13
Média	435	315	125
Máx.	1036	450	245
Mín.	200	162	41
Desvio padrão	220	82	63

Fonte: Adaptado de Delazare (2004).

Com os valores da concentração de DQO na entrada e saída do reator UASB é possível calcular a eficiência do mesmo. Sendo assim, o reator UASB da ETE-UFES apresentou uma eficiência de remoção de DQO de 60%. Do total de DQO removida, uma fração é convertida em biogás, outra em lodo e ainda existem as perdas de metano.

Os valores médios, máximos e mínimos referentes à vazão de biogás, vazão de esgoto e carga orgânica aplicada de DQO são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Estatísticas relativas durante os 141 dias de monitoramento

	Biogás (L/min)	Esgoto (L/s)	Carga Orgânica Aplicada (kgDQO/dia)
N° amostras	141	141	13
Média	3,83	0,87	25,32
Máximo	9,30	1,29	33,4
Mínimo	0,27	0,09	11,34
Desvio Padrão	1,91	0,04	5,94

Fonte: Delazare (2004).

O monitoramento do biogás ao longo dos 141 dias obteve uma produção média de 3,83 L/min. Essa produção média equivale a 5.486,40 litros (aproximadamente 5,5 m³) de biogás produzido diariamente no reator UASB.

De acordo com a Figura 17e com a série histórica do monitoramento de biogás (Anexo A) observa-se que a produção do biogás foi maior no período de Dezembro

de 2002 à Janeiro de 2003, devido provavelmente a uma maior carga orgânica aplicada neste período.

A vazão média de biogás produzido no reator UASB, obtida por Delazare (2004), pode ser comparada com valores de outras pesquisas realizadas na ETE-UFES. O trabalho desenvolvido por Silva (2003) monitorou o reator UASB no período de janeiro à agosto de 2002 e obteve uma produção de 3,70 L/min, enquanto que Veronez (2001) monitorou o reator no período de junho à novembro de 2001 e obteve uma produção de 3,23 L/min. Observa-se, portanto, que o valor médio de vazão de biogás encontrada por Delazare (2004) é bem próximo aos valores das outras referências citadas, o que confirma a coerências dos seus resultados.

Como pode ser observado na Tabela 8, foi obtida uma vazão média de esgoto afluente ao reator UASB, ao longo dos 141 dias de monitoramento, de 0,87 L/s.

A Tabela 9 apresenta uma correlação entre o volume de metano produzido e capturado diariamente com a massa de DQO removida por dia no reator UASB.

Tabela 9: Correlação entre o volume de CH₄ e massa de DQO removida

Biogás produzido (L/dia)	CH ₄ produzido (L/dia)	DQO _{removida} ² (Kg/dia)	mlCH ₄ /gDQO _{removida}
(a)	(b=0,85a) ¹	(c)	(b/c)
5.486,40	4.663,44	16,42	284,01

¹ Composição de metano no biogás lavado, encontrada por cromatografia, igual a 85 %.

² $Carga\ DQO_{removida} = Carga\ DQO_{aplicada} - Carga\ DQO_{saída}$

Fonte: Adaptado de Delazare (2004).

Em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), são necessários 350 mlCH₄/gDQO_{removida}. No entanto, sabe-se que a temperatura de operação do reator UASB da ETE-UFES, segundo Delazare (2003), é de 23°C, tornando necessário a consideração dessa temperatura no cálculo, obtendo um relação de aproximadamente 380 mlCH₄/DQO_{removida}. O valor de 284,01 mlCH₄/gDQO_{removida} representa 74,7 % deste valor, o que equivale a uma perda de metano, em relação ao valor teórico, de 25,3%.

A Tabela 10 abaixo indica as perdas de metano encontradas por outros trabalhos.

Tabela 10: Perdas de metano encontradas por outras metodologias

Autor	Porcentagem da perda de metano
Van Haandel & Lettinga (1994)	20% a 50%
Agrawal <i>et al.</i> (1997)	50%
Singh & Viraragahvan (1998)	60%
Keller & Hartley(2001)	14%
Souza <i>et al.</i> (2009)	44,80%

Comparando a perda de metano encontrada por Delazare(2004) com estas outras referências, observa-se que o trabalho da autora apresentou uma perda de metano próxima a esses valores.

6.2 Caracterização qualitativa do biogás da ETE-UFES

Os resultados da composição gasosa do biogás produzido na ETE-UFES, no período analisado, estão descritos na Tabela 11e seus cromatogramas estão incluídos no Anexo B.

Tabela 11: Composição do biogás produzido na ETE- UFES

Amostras	Biogás Bruto(%)				
	CH₄	CO₂	O₂	N₂	H₂S
1	85,61	4,35	0,15	9,73	0,16
2	84,64	4,40	0,24	10,57	0,16
3	86,35	2,79	1,57	9,21	0,09
4	81,23	4,78	1,13	12,67	0,19
5	86,70	2,82	1,59	8,81	0,09
6*	64,61	3,57	5,36	26,67	0,31
7*	69,78	7,21	4,61	18,18	0,21
8*	59,70	6,13	7,87	26,11	0,18
N° amostras	8	8	8	8	8
Média	77,33	4,51	2,82	15,18	0,17
Desvio Padrão	10,93	1,55	2,8	7,39	0,07
Máximo	86,7	7,21	7,87	26,15	0,31
Mínimo	59,7	2,79	0,15	8,81	0,09
Coef. Vari.	77,33	4,51	2,82	15,18	0,17

*problemas operacionais na ETE – UFES

Fonte: Delazare (2004).

Com os dados apresentados na Tabela 11, tem-se que o metano é o gás que apresenta maior percentual na composição do biogás bruto, como já era esperado, apresentando concentrações médias de 77, 33%. O teor de gás sulfídrico também apresenta grande importância na análise qualitativa do biogás, por ter propriedade corrosiva torna-se um prejuízo ao biogás, sendo necessária a sua eliminação. A concentração média de gás sulfídrico nas amostras de biogás bruto é de 0,17%.

Devido aos erros operacionais ocorridos na ETE-UFES durante as amostragens 6, 7 e 8 o biogás apresentou-se com baixos teores de metano e um aumento nas concentrações de monóxido de carbono, oxigênio, ácido sulfídrico e principalmente nitrogênio. Se fossem desconsideradas estas amostras, o biogás teria a seguinte composição: 84,91% de metano; 3,83% de gás carbônico; 0,93% de oxigênio; 10,19% para nitrogênio e 0,13% para gás sulfídrico.

Os resultados da composição gasosa do biogás lavado, após passar por uma solução alcalina, no período analisado, estão descritos na Tabela 12 e seus cromatogramas estão incluídos no Anexo.

Tabela 12: Composição do biogás lavado

Amostras	Biogás Lavado (%)				
	CH₄	CO₂	O₂	N₂	H₂S
1	84,97	3,21	0,29	11,53	0,00
2	84,61	2,41	2,00	10,96	0,00
3	85,78	1,79	0,87	11,57	0,00
4	85,01	2,43	2,04	10,49	0,00
5	88,12	0,72	0,44	10,72	0,00
6	83,87	1,66	1,52	12,94	0,00
7	83,63	1,65	1,60	13,12	0,00
8	88,75	3,04	1,68	6,53	0,00
N° amostras	8	8	8	8	8
Média	85,59	2,11	1,31	10,98	0,00
Desvio Padrão	1,89	0,82	0,68	2,04	0,00
Máximo	88,75	3,21	2,04	13,12	0,00
Mínimo	83,63	0,72	0,29	6,53	0,00
Coef. Vari.	2,20	38,84	52,42	18,59	-

Fonte: Delazare (2004).

Com os dados obtidos, observa-se que a concentração média de metano do biogás lavado é de 85,59% enquanto o gás sulfídrico é nulo, o que comprova que o sistema de lavagem do biogás utilizado foi eficiente para a remoção de tal impureza.

Tabela 13: Comparação na composição do biogás bruto e lavado

Amostras	Composição (%)				
	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ S
Biogás bruto	77,33	4,50	2,81	15,18	0,17
Biogás lavado	85,59	2,11	1,30	10,98	0,00
Variação (%)	10,68(+)	53,11(-)	53,73(-)	27,67(-)	100(-)

(+) =aumento; (-) = redução.

A comparação dos resultados entre biogás bruto e biogás lavado mostra que o sistema de lavagem atuou de forma a reduzir ou eliminar as impurezas do biogás, que atuam diminuindo o potencial energético deste e aumentou a porcentagem de metano na composição de biogás, que aumenta a sua eficiência de aproveitamento.

A remoção de 53,11 % de gás carbônico pela lavagem só não foi maior, devido ao pequeno contato gás-líquido na solução de alcalina do selo hídrico, fazendo com que não haja a remoção de gás carbônico sob as formas de carbonatos e bicarbonatos de sódio.

6.3 Energia disponível no biogás produzido na ETE-UFES

Cálculo da energia térmica

Para calcular a energia térmica disponível no biogás, utilizaram-se o valor médio da vazão diária do biogás medido por Delazare (2004) e o teor de metano na composição do biogás obtido por cromatografia, também realizada por Delazare (2004). Considerou-se o poder calorífico inferior do metano igual a 8500 kcal/m³, conforme dito anteriormente.

$$E_t = (Q_{biogás} \cdot t_{metano}) \cdot PCI_{metano}$$

$$E_t = (5,48640 \text{ m}^3/\text{dia}) \cdot (85,59\%) \cdot (8500 \text{ kcal/m}^3)$$

$$E_t = 39.914,38 \text{ kcal/dia}$$

Cálculo da energia elétrica

A potência elétrica do biogás depende do tipo da máquina térmica e do gerador utilizado. As eficiências das máquinas (microturbina, turbina a gás, motor de combustão interna) são bem próximas, podendo ser adotado um valor médio de 30%. Considerou-se o rendimento do gerador igual a 87%, uma vez que geradores apropriados para essas máquinas apresentam rendimentos na faixa entre 85 a 90%.

$$PE_{biogás} = \frac{E_t \cdot 4,184 \cdot n_{tec} \cdot n_{gerador}}{86.400}$$

$$PE_{biogás} = \frac{(39.914,38 \text{ kcal/dia}) \cdot (4,184 \text{ KJ/kcal}) \cdot 0,3 \cdot 0,87}{86.400 \text{ dias/s}}$$

$$PE_{biogás} = 0,5044 \text{ KJ/s} = 0,5044 \text{ kW}$$

Com o valor encontrado da potência elétrica do biogás, calcula-se então a energia elétrica gerada pelo biogás. Considerou-se um tempo de operação do motor igual a 24h/dia.

$$E_e = PE_{biogás} \cdot T_{Operação}$$

$$E_e = 0,5044 \text{ KW} \cdot 24 \text{ h/dia}$$

$$E_e = 12,1056 \text{ KWh/dia}$$

Considerando que a ETE-UFES recebe esgoto de uma população de aproximadamente 500 habitantes, encontra-se uma produção de energia térmica e elétrica diária *per capita* igual a 79,83 kcal/hab.dia e 0,024 kWh/hab.dia, respectivamente.

A energia térmica, gerada pela queima direta do biogás, pode ser aplicada no processo de secagem do lodo de esgoto da ETE-UFES. Como esse processo é obtido geralmente apenas pela energia solar, a aplicação da energia do biogás no leito de secagem pode promover a aceleração da desidratação do lodo.

O valor de energia elétrica encontrado é muito baixo. Isso se deve à pequena vazão de esgoto que chega à ETE-UFES. Admitindo uma eficiência da máquina térmica de

30% e um rendimento do gerador de 87%, obteve-se como resultado a possibilidade de geração de 0,024 kWh/hab.dia (8,76 kWh/hab.ano). A ETE-UFES utiliza como sistema de tratamento o reator UASB + biofiltros aerados submersos, que demanda uma energia de 14 a 20 kWh/hab.ano, segundo von Sperling (2004), conforme mostrado no Quadro 3. Visto isso, conclui-se que a energia elétrica gerada pelo biogás da ETE-UFES é insuficiente para abastecer a demanda energética do sistema de tratamento da referida ETE.

Sendo assim, descartou-se a possibilidade de implantação de um sistema de conversão em energia elétrica do biogás para a ETE-UFES, mas achou-se necessário apresentar as possíveis rotas que o biogás coletado no reator UASB pode seguir, com o objetivo de auxiliar trabalhos futuros relacionados ao aproveitamento energético do biogás.

6.4 Levantamento de procedimentos para a utilização energética do biogás gerados em ETE-UFES

O biogás produzido no reator UASB de uma ETE, após ser coletado, pode ser queimado em *flare* para em seguida ser lançado na atmosfera ou ser utilizado como fonte energética. Quando se pretende aproveitar o seu potencial energético na própria ETE é necessário que o gás seja encaminhado para um sistema de purificação, um local de armazenamento, para depois ser convertido em energia elétrica ou utilizado como energia térmica. A Figura 18 apresenta um fluxograma das rotas do biogás após a sua captação no reator UASB.

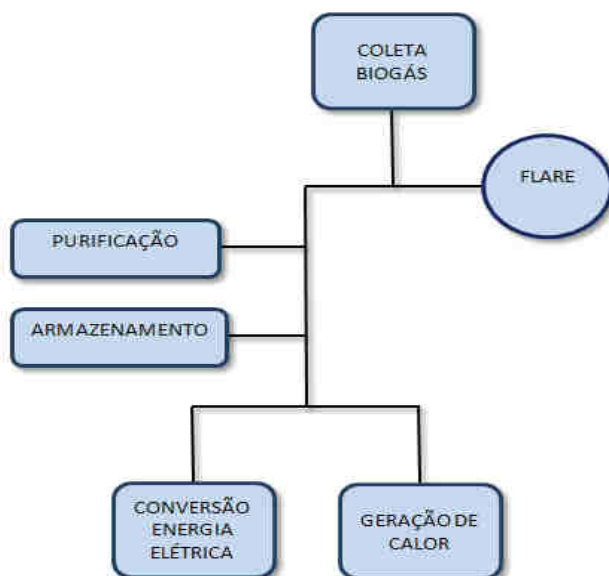


Figura 18: Fluxograma das rotas do biogás após ser coletado no reator UASB

A geração de calor a partir da queima direta do biogás pode ser aplicada no leito de secagem da própria estação de tratamento de esgoto, o que promove a aceleração dos processos de desidratação do lodo. Já a energia elétrica produzida através de uma tecnologia de conversão pode ser aplicada nas operações da ETE, por exemplo, nos aeradores e bombas, reduzindo assim os custos de operação.

A seguir serão apresentados os métodos e procedimentos adotados por diferentes autores em cada etapa da rota do biogás coletado em reatores UASB de ETEs (sistema de purificação; armazenamento; secagem térmica do lodo a partir do calor do biogás; e geração de eletricidade).

6.4.1 Purificação do biogás

Todas as utilizações de biogás, exigem sua purificação devido a quatro principais motivos: (i) que a qualidade do biogás seja compatível às exigências mínimas dos equipamentos de conversão de biogás, (ii) a eliminação de compostos que possam causar danos aos equipamentos, (iii) que haja o aumento de poder calorífico do biogás devido ao aumento da concentração de metano em sua composição, e (iv) que a qualidade do biogás seja equiparável à de gases mais nobres.

Segundo Monte (2010), em uma ETE o enriquecimento do biogás tem como objetivo a otimização da conversão deste em energia, seja térmica ou elétrica, que normalmente exige a eliminação de excessos de umidade e de contaminantes como o dióxido de carbono, gás sulfídrico, partículas, mercaptanos e siloxanos.

Sendo assim, foram reunidos alguns métodos de purificação, para eliminação das impurezas do biogás, já utilizados em outros trabalhos/experimentos (Quadro 6).

Quadro 6: Principais características do sistema de purificação do biogás de diferentes ETEs pesquisadas

	Frare <i>et al.</i> (2009)	Pecora (2006)	Costa (2006)
Local	ETE Gelita – Maringá, PR	Conjunto Residencial da USP – Projeto PUREFA	ETE SABESP – Barueri
Vazão diária de esgoto	Não informa	0,83 l/s	750 l/s
Vazão diária de biogás	0,38m³/dia	5,27 m³/dia	24.000 m³/dia
Local do sistema de purificação	Ex situ	Linha de captação do biogás	Ao longo da linha do projeto instalado
Composição do sistema de purificação e suas respectivas funções	- Colunas de borbulhamentos com solução de Fe³-/EDTA (princípio da absorção química) ¹	- Um recipiente que retém água condensada na tubulação; - Duas peneiras moleculares: uma retira a umidade e a outra retira o H₂S por sílica gel - Cavaco de ferro: retira o H₂S residual (Figura 19)	- Três filtros coalescentes: remoção da umidade e H₂S solubilizado na água; - Um filtro de carvão ativado: remoção do H₂S gasoso (princípio de adsorção); - Dois secadores por refrigeração: remoção da umidade e H₂S solubilizado na água
H₂S no biogás bruto	2,41 %	649 ppm	Não informa
H₂S no biogás purificado	0%	< 1,0 ppm	0,08 – 230 ppm
H₂O no biogás bruto	Não informa	2,62 %	Não informa
H₂O no biogás purificado	Não informa	0,98 %	0,1 – 2,8 %
Tecnologia de conversão	Ausente	Presente	Presente
Análise dos Resultados	Remoção de 100% de H₂S quando a razão entre as vazões biogás/Solução Fe³-/EDTA for de 0,46.	O sistema de purificação se mostrou eficiente quanto à retirada de umidade e H₂S	O sistema de purificação atendeu às necessidades requeridas pela tecnologia de conversão (microturbina Capstone)

¹Em uma coluna ocorre a reação da solução de Fe³-/EDTA com o biogás bruto, devido a corrente de fluxo. Na base desta coluna obtém-se a solução de Fe³-/EDTA que será regenerada, enquanto no topo da coluna o biogás sai tratado e se direciona para a segunda coluna. Na segunda coluna, composta por anéis de Rasching, o biogás tratado ainda passa por um sistema de absorção com água.

O sistema de purificação do biogás adotado pela pesquisa de Pecora (2006) pode ser visualizado na Figura 19.



Figura 19: Sistema de purificação do biogás adotado por Pecora (2006)

Fonte: Pecora (2006)

Observa-se que o método de lavagem a ser utilizado depende do tipo de aplicação do biogás, uma vez que cada aplicação requer a remoção de substâncias específicas. O projeto desenvolvido por Costa (2006), por exemplo, utilizou um método de purificação do biogás com a finalidade de atender as exigências requeridas pela microturbina Capstone. Outro fato observado é a existência de diferentes métodos de purificação para a remoção de uma mesma substância. Os projetos realizados Frare *et al.* (2009), Pecora (2006) e Costa (2006) utilizaram técnicas diferentes para a remoção de umidade e H_2S , sendo que todas mostraram-se eficientes.

A escolha da técnica de purificação do biogás, portanto, fica a critério do responsável pelo projeto, devendo levar em consideração a simplicidade da técnica, os custos e eficiência de remoção da substância indesejada.

6.4.2 Armazenamento do biogás

O reator UASB é uma estrutura fechada devido a anaerobiose de seus microrganismos, portanto, o biogás gerado fica retido dentro do mesmo. Sendo assim, é necessário um sistema de drenagem que direciona o biogás para seu destino final, seja para os queimadores ou para os equipamentos de utilização do biogás. Para fins de utilização do biogás, surge a necessidade de armazená-lo, uma vez que o volume produzido não é suficiente para sua aplicação energética.

O biogás contendo principalmente metano não pode ser facilmente armazenado e nem liquefeito a pressão e temperatura ambiente (temperatura crítica de -82°C e pressão 47,5 bar)(SALOMON, 2007). Os sistemas de armazenamento mais comumente utilizados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Sistemas de armazenamento de biogás

Pressão	Estocagem	Material
Baixa (0,138 - 0,414 bar)	Selo d'água	Aço
Baixa	Gás 'bag'	Plástico, vinil, lona (borracha)
Média (1,05 - 1,97 bar)	Tanques de propano e butano	Aço
Alta (200 bar)	Cilindros comerciais de gás	Aço

Fonte: Salomon (2007)

Atualmente, graças à disponibilidade da tecnologia de materiais, existem diversos tecidos plastificados e elastômeros à base de borracha, que permitem a construção de gasômetros infláveis e de baixo custo, comparativo aos gasômetros e vasos de pressão metálicos (AZEVEDO *et al.*, 2004).

Segundo Coelho *et al.* (2006), a utilização de gasômetros descarta a ideia inicial de instalar um compressor, que exigiria uma outra série de equipamentos sofisticados, tais como secadores.

A função do gasômetro é o armazenamento do gás, permitindo ainda a manutenção de uma pressão de saída constante. Não possui muitos detalhes, a única peça agregada é a torneira para controlar a saída do gás.

Segundo Azevedo *et al.* (2004), o dimensionamento do reservatório, ou gasômetro, deve-se levar em consideração a demanda diária de gás, a curva de variação da demanda em função da hora do dia e a taxa de produção de gás pelo digestor. Recomenda-se que os reservatórios ou gasômetros tenham capacidade de armazenar no mínimo a produção de 4 a 8 horas do biodigestor, assim é usual dimensionar o gasômetro entre 1/3 e 1/6 da produção diária de biogás para biodigestores de grande capacidade de produção. No entanto com biodigestores de

pequena capacidade de produção aconselha-se a dimensionar o gasômetro com uma capacidade maior, da ordem de 50% da produção diária.

Foram estudados alguns gasômetros utilizados em pesquisas sobre o armazenamento de biogás, e seus parâmetros estão apresentados na Quadro 7a seguir.

Quadro 7: Parâmetros de gasômetros utilizados em pesquisas sobre biogás

	Borges & Cherchinaro (2009)	Coelho <i>et al.</i> (2006)	Azevedo <i>et al.</i> (2004)
Vazão de esgoto	0,02 l/s	0,83 l/s	37 l/s
Vazão de Biogás	0,2m ³ /dia	4m ³ /dia	5,95m ³ /dia
Material	Polietileno	PVC - Dupla camada	Elastômero à base de borracha
Formato	Semi-esférico	Semi-esférico	Semi-esférico
Diâmetro	500mm	2000mm	-
Volume útil	0,11m ³	10m ³	70m ³



Figura 20: Gasômetro utilizado na pesquisa de Costa (2006)

Fonte: Costa (2006)

Sendo assim, é possível utilizar várias formas de armazenar o biogás produzido. Devido ao avanço tecnológico e ao melhor conhecimento e desenvolvimento de novos materiais, os reservatórios podem ter diversas formas e serem construído por materiais diversos. Não há uma forma e/ou material exato, mas existe a necessidade de que o reservatório tenha capacidade de suprir a demanda de biogás produzido e que seja inerte e hermeticamente fechado, preservando assim, as propriedades do biogás armazenado.

6.4.3 Secagem e desinfecção do lodo com o calor do biogás

Uma das alternativas da utilização do biogás proveniente do reator UASB da ETE-UFES é o aproveitamento do seu calor para secagem e desinfecção do lodo de esgoto.

A ETE-UFES apresenta um leito de secagem composto por duas células e com um volume total de 10m³, onde ocorre a desidratação do lodo descartado no tratamento do esgoto de forma natural, ou seja, apenas pela luz solar. A estabilização do lodo de descartegeralmente é obtida a partir da mistura do lodo com cal virgem. O lodo calado é então estocado num pátio, podendo em seguida ser utilizado em atividades agronômicas.

A utilização do calor do biogás no leito de secagem promoveria ahigienização e a aceleração dos processos de secagem do lodo, com custos relativamente baixos devido à utilização do biogás, além de se dispensar a utilização de cal ou reduzir a sua quantidade.



Figura 21: Leito de secagem da ETE-UFES

Fonte: Sá (2004)

Foi feita uma pesquisa sobre trabalhos que utilizaram o biogás, produzidos em reatores UASB de ETEs, como fonte de energia calorífica para promover a secagem

térmica do lodo de esgoto. O quadro a seguir apresenta dois trabalhos que utilizaram processos diferentes de queima do biogás para aquecimento do lodo.

Quadro 8: Principais características de dois sistemas de secagem do lodo de esgoto utilizando biogás gerado na própria ETE

	Andreoli <i>et al.</i> (2002)	Ferreira (2001)
Local	ETE Guaraituba (Curitiba)	ETE Guaraituba (Curitiba)
Vazão de esgoto	46,88 l/s	46,88 l/s
Origem do lodo	Reator UASB	Reator UASB
Dimensões do leito de secagem	Não informa	5,0m x 5,0m
Apresenta estufa plástica (sim/não)	Sim	Sim
Local de queima do biogás	Fora da estufa	Dentro da estufa ¹
Condução do biogás armazenado ao local de queima	Tubulação de PVC	Tubulação de PVC
Características da queima do biogás	Dois aquecedores ligados em série (200 L cada um) que queimam o biogás para aquecimento do óleo que irá aquecer o leito de secagem (Figura 22)	Canalização de ferro galvanizado à 5 metros de altura do fundo do leito de secagem com quatro bicos queimadores com capela de ferro sobre a chama (Figura 23)
Forma de aquecimento do leito de secagem	Óleo aquecido pelo calor do biogás é circulado por bombas em tubos de cobre com distâncias entre si de 30 cm na camada superficial do leito de secagem ² (Figura 22)	Calor gerado pela queima do biogás no próprio leito de secagem

¹ Presença de selo hídrico antes da estufa para evitar o retorno do biogás ao reator UASB.

² Neste trabalho obteve-se, além da desidratação do lodo, a inviabilização dos ovos de helmintos.

As Figura 22 e Figura 23 apresentam os dois métodos de secagem do lodo, a partir do calor gerado pela queima do biogás, adotados em cada estudo de caso.

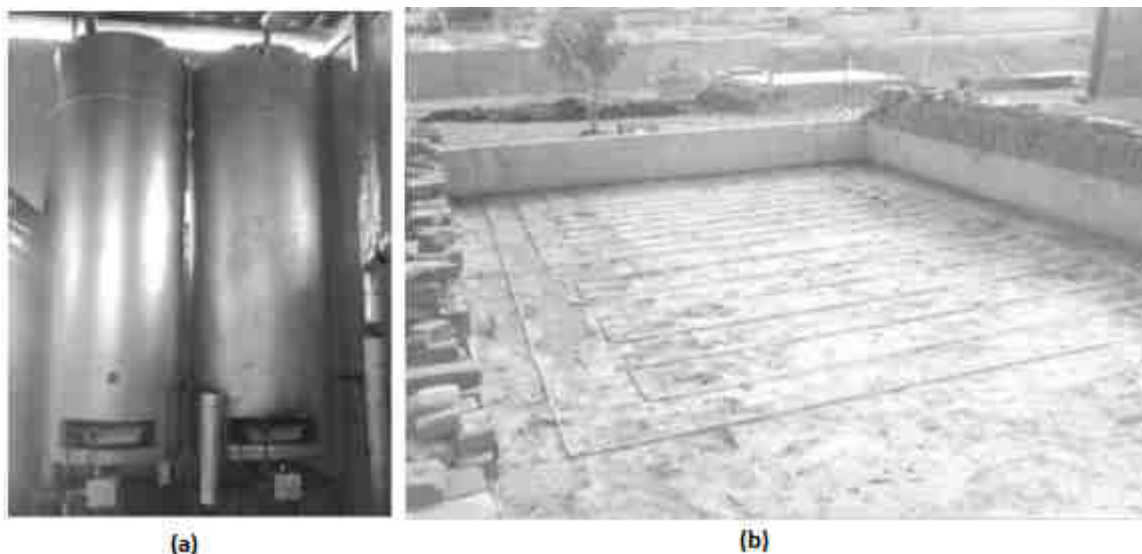


Figura 22: Método de secagem do lodo adotado por Andreoli *et al.* (2002). (a) Aquecedores em série para a queima do biogás; (b) Leito de secagem aquecido por óleo

Fonte: Andreoli *et al.* (2002)



Figura 23: Método de secagem do lodo adotado por Ferreira (2001)

Fonte: Ferreira (2001)

A pesquisa realizada possibilitou conhecer duas técnicas de secagem do lodo a partir do calor fornecido pela queima do biogás. A implantação dessas técnicas que utilizam o calor do biogás representa uma boa alternativa para desidratar e higienizar o lodo, uma vez que esse procedimento apresenta uma boa eficiência,

acelera os processo de secagem e ainda pode reduzir ou até dispensar o uso de cal virgem para estabilização do lodo.

6.4.4 Conversão do biogás em energia elétrica

Para gerar energia elétrica a partir do biogás proveniente da ETE, deve-se determinar a mais viável tecnologia de conversão. Para isso, é importante identificar fatores como a potência, rendimento do equipamento, emissões de NOx, custo/benefício, tempo de vida, entre outros. Além disso, é necessário conhecer as exigências da tecnologia escolhida, a fim de mitigar as perdas atreladas aos processos de transformação energética, fazendo com que a eficiência do processo aumente.

Foi realizada uma pesquisa sobre as principais tecnologias de conversão existentes no mercado que são aplicadas ao biogás. Analisou-se as suas principais características, entre elas a potência, rendimento, emissões de NOx e exigências de operação, como pode ser observado no Quadro 9.

Também foi realizada uma pesquisa sobre estudos de caso que fizeram uma comparação entre duas tecnologias de conversão aplicadas ao biogás, onde se analisaram aspectos técnicos e econômicos para escolher o equipamento mais viável (Quadro 10).

Quadro 9: Principais características das tecnologias de conversão

	Microturbina	Turbina a gás¹	Motores Diesel: Biogás + Diesel²	Motores a gás Ciclo – Otto
Faixa de potência	30 kW - 100 kW	500 kW - 150 MW	Informação não encontrada ³	30 kW - 20 MW
Rendimento	24 a 28 %	20 a 30 %	30 a 35 %	30 a 40 %
Emissões de NOx	< 9 ppm	35 ppm - 50 ppm	Em torno de 27 ppm	250ppm - 3.000 ppm
Temperatura do gás de exaustão	275 °C (Capstone)	400 - 600 °C	300 - 400 °C	500 - 900 °C

Peso	Baixo	Baixo	Médio	Alto
Tempo de vida	Longo	Longo	Curto	Curto
Ruído	Silencioso	Silencioso	Alto	Alto
Fabricantes ou Fornecedores	Capstone, Elliott MagneTek, AlliedSignal, GRI/Northern Research, Teledyne/Ryan	Solar Turbines, Caterpillar	MWM International, Maxxforce, Guascor Power	Yanmar, Branco

¹ Apresenta como exigência de operação a remoção de compostos corrosivos do biogás e não geração de cinzas

² Apresenta como exigência de operação um diesel com baixo teor de enxofre

³ Exemplos de motores Diesel + Biogás: 630 kW (Modelo SFD 360, Guascor Power), 314 kW (Modelo SFD 180, Guascor Power)

Fontes: Costa (2006), Pecora (2006), Deublein & Steinhauser (2008), Mitzlaff (1988).

Quadro 10: Estudos de caso para geração de energia elétrica a partir do biogás

	Costa (2006)		Littig (2011)	
Estudo de caso	Comparação entre duas tecnologias		Comparação entre duas tecnologias	
Local	ETE Barueri		ETE UFES	
Vazão de esgoto	7500 l/s		1,0 l/s	
Vazão de biogás	24.000 m³/dia		6,627 m³/dia	
Tipo da tecnologia de conversão	Microturbina	Grupo Gerador (Ciclo-Otto)	Combustão interna (Ciclo-Otto)	Combustão interna
Fabricante	Capstone – Enedis	Trigás	Branco	Branco
Modelo	Microturbina Capstone Modelo 330	Não informa	B4T 500	B4T 100000 Bio
Potência	30 kW	30 kW	3,6 kW	8 kW
Sistema de purificação do biogás	Remoção de umidade e H ₂ S	Ausente	Remoção de H ₂ S	Remoção de H ₂ S
Custo apenas do equipamento de conversão	R\$ 109.756,10	R\$ 21.200,00	R\$ 4.320,00	R\$11.340,00
Investimento total em equipamentos	R\$ 151.046,40	R\$ 24.680,00	R\$ 6.876,94	R\$16.453,64
Custo total de operação e manutenção	R\$ 141.585,48	R\$ 3.400,00	R\$ 4.377,82	10474.46
Energia elétrica líquida gerada pelo equipamento (média)	19,5 kW (170820 kWh anual)	25 kW (219000 kWh anual)	2,1 kW (2358,72 kWh anual)	3,6 kW (1965,6 kWh anual – não funciona nos finais de semana)
Regime de operação	24h	24h	3h	2,1h
Aplicação	Energia entregue à rede	Energia entregue à rede	Consumo da própria ETE	Consumo da própria ETE
Tecnologia mais viável		X	X	

Ambos autores analisaram as tecnologias de forma a determinar a mais viável economicamente, todavia, deve-se analisar além disto, as vantagens e desvantagens do emprego da tecnologia de conversão. Destacam-se fatores como a potência, rendimento do equipamento, emissões de NOx, tempo de vida, necessidade de combustível adicional e exigências de operação dos equipamentos. Sendo assim, o Quadro 11 apresenta um resumo das principais vantagens e desvantagens dos equipamentos de conversão abordadas neste trabalho.

Quadro 11: Principais vantagens e desvantagens das tecnologias de conversão

	Vantagens	Desvantagens
Microturbina	<ul style="list-style-type: none"> - Menor taxa de emissão de NOx - Simplicidade de projeto; - Fácil instalação e manuseio; - Baixo custo de manutenção 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto custo de instalação; - Baixo tempo de vida útil
Turbina a gás	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada fiabilidade; - Rápido arranque; - Disponibiliza energia térmica a temperaturas elevadas (500 - 600°C); - Emissão reduzida de poluentes atmosféricos; - Não necessita de refrigeração; - Unidades compactas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Exigência de elevada pressão no gás combustível admitido ou de um compressor; - Redução da eficiência a cargas baixas; - Sensibilidade do desempenho face ao aumento da temperatura ambiente. - Necessidade de manutenções periódicas
Motores Diesel: Biogás + Diesel	<ul style="list-style-type: none"> - Maior eficiência na queima de biogás (por serem projetados para queimar óleo diesel, enquanto queimam biogás) - Máquinas mais simples e robustas 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de abastecimento periódico de diesel - Necessidade de manutenção - Problemas relacionados à combustão do diesel e à emissão de poluentes deste.
Motores Ciclo-Otto	<ul style="list-style-type: none"> - Arranque rápido; - Fácil adaptação a variações das necessidades térmicas; - Elevada eficiência mecânica; - Bom rendimento em regime de carga variável; 	<ul style="list-style-type: none"> - Tempo de vida útil curto para sistemas de baixas potências; - Baixo rendimento térmico; - Custos de manutenção elevados, exigindo paragens frequentes; - Necessidade de refrigeração;

	- Custos de investimento relativamente baixos.	- Emissão de níveis de ruído elevados a baixas frequências.
--	--	---

Fonte: CIENBIO (2000, apud PECORA, 2006), Monte (2010) e Fabricante Arapongas.

A pesquisa possibilitou conhecer os equipamentos existentes no mercado nacional e as possíveis técnicas que são utilizadas em cada fase do processo de aproveitamento energético do biogás. É possível observar que atualmente ainda existem poucos casos no Brasil de aplicação do potencial energético do biogás gerado em ETEs. Além disso, verificou-se que os equipamentos de conversão utilizados, na maioria dos casos, são importados. Não existem muitos fabricantes nacionais destes equipamentos, uma vez que a aplicação do potencial energético do biogás no Brasil é recente e os fabricantes nacionais existentes ainda produzem tecnologias em baixa escala e de pequeno porte.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal a avaliação da disponibilidade energética do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. Para isso foi necessário conhecer a caracterização quali-quantitativa do biogás e calcular a sua energia disponível. Considerou-se importante realizar um levantamento de procedimentos, já utilizados em outros projetos e pesquisas, para o aproveitamento energético do biogás de ETEs com o objetivo de auxiliar trabalhos futuros.

A caracterização quali-quantitativa do biogás produzido na ETE-UFES apresentou como resultados uma produção diária de biogás igual a 5.486,40 litros, um teor de metano presente no biogás lavado igual a 85% e uma carga de 16,42 kg de DQO removida por dia, o que possibilitou encontrar uma relação de 284,01 ml de metano produzido a cada grama de DQO removida. Comparando esse valor encontrado com o valor teórico ($380 \text{ mlCH}_4/\text{gDQO}_{\text{removida}}$), observou-se uma perda de metano equivalente a 25,3 %. Esta perda, quando comparada com valores encontrados por outras referências, pode ser considerada normal.

Verificou-se que o biogás gerado na ETE-UFES apresentou uma possibilidade de geração de apenas 0,024 kWh/hab.dia, não sendo capaz de suprir a demanda energética da própria ETE. Isto se deve principalmente à baixa vazão de esgoto que

chega à referida ETE. No entanto, a aplicação da energia térmica, gerada pela queima direta do biogás, equivalente a 78,83 kcal/hab.dia, no processo de secagem do lodo da ETE é considerada uma boa alternativa para a destinação deste gás. Visto isso, conclui-se que para o caso da ETE-UFES a melhor alternativa é o aproveitamento da sua energia térmica para secar o lodo.

Queimar o biogás produzido no processo de digestão anaeróbia nos reatores UASB em flare para em seguida lançá-lo na atmosfera consiste em um desperdício, pois este gás apresenta um potencial energético que poderia ser aproveitado. Além disso, a liberação do biogás para atmosfera pode representar uma ameaça ao meio ambiente, já que o metano apresenta grande contribuição para o efeito estufa. Diante disso, pode-se concluir que o aproveitamento energético do biogás gerado em ETEs surge como uma boa alternativa para a sua destinação.

O aproveitamento energético do biogás pode trazer grandes vantagens como a redução das emissões de metano, maior controle da geração de odor e aplicação da energia gerada na própria ETE, o que reduz a eletricidade comprada da rede. No entanto, a prática do reaproveitamento do biogás é pouca observada no Brasil. Acredita-se ser necessário mais investimento, incentivos e pesquisas nesta área a fim de romper as barreiras tecnológicas, econômicas e políticas que tornariam o uso do biogás mais promissor no Brasil nos próximos anos.

8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os tópicos abordados pelo presente trabalho, recomenda-se que futuras investigações tenham por objetivo:

- Pesquisar as perdas de metano na digestão anaeróbia e os fatores que as influencia procurando solucioná-las, com objetivo de ampliar o aproveitamento energético do biogás;
- Relacionar a redução da emissão de metano proveniente do biogás com a geração de créditos de carbono.
- Aperfeiçoar as técnicas de purificação do biogás a fim de obter em sua composição um maior percentual de metano e, conseqüentemente, um maior poder calorífico.
- Avaliar a eficiência da remoção de umidade e organismos patogênicos na secagem térmica do lodo com uso do biogás.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. 2000. 142 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANDREOLI, C. B., FERREIRA, A. C., CHERUBIN, C., FRANÇA, M. **Desinfecção e secagem térmica de lodo de esgoto anaeróbio pelo uso de biogás**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Joinville, set., 2002.

AVELLAR, L. H. N. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental**. 2001, 111f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2001.

AZEVEDO, M., SILVA, M. C., TAUCHEST O. I. **Cogeração de energia utilizando o biogás do esgoto sanitário realizado na Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR**. 2004. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Medianeira, 2004.

BORGES S. M. B., CHERNICHARO, C. A. L., **Efeito do tratamento térmico de lodo anaeróbio sobre as características de biodegradabilidade da fração orgânica**. Eng. Sanit. Ambiental. [online]. 2009, vol.14, n.4, pp. 489-498.

CAMPOS, J. R. (coordenador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, 1999. 464 p.

CASSINI, S. T. (Coordenador). **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de Biogás**. 1. Ed. Vitória: PROSAB/FINEP, 2003. 196p.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Medidas mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica**. Brasília: Dupligráfica Editora, 2000. 222 p.

CHERNICHARO, C. A. L. (Coordenador). **Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios: Aspectos Metodológicos**. 1 ed. Belo Horizonte; PROSAB/FINEP, 2001. 118p.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFGM, v. 5, 1997. 380 p.

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN HAANDEL, A.; AISSE, M. M.; CAVALCANTI, P. F. F. Capítulo 7: Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo. In: CAMPOS, J. R. (coordenador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, 1999. p. 155-198.

COELHO, S. T., VELÁZQUEZ, S. M. S. G., PECORA, V., ABREU, F. C. **Geração de Energia Elétrica A Partir Do Biogás Proveniente Do Tratamento De Esgoto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA (CBE), 11., 2006, Rio de Janeiro: **Anais do XI Congresso Brasileiro de Energia**, 2006. p. 547-562.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto**. 2006. 194 f. Dissertação (mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

COSTA, D. F.; FERLING, F. F.; NOGUEIRA, F. G. **Produção de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos**. Trabalho de Graduação Interdisciplinar para Conclusão de Curso da Faculdade de Engenharia FAAP. São Paulo, 2001.

COURA, M. A.; VAN HAANDEL, A. C. **Viabilidade técnica e econômica do digestor anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) no sistema anaeróbio/aeróbio**. Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES) - Arquivo de referência: I - 169, Rio de Janeiro, 1999.

CRIBARI, B. S. **Secagem térmica do Lodo de Esgoto Gerado em uma estação de tratamento do tipo UASB + Biofiltro Aerados Submersos**. 2004 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

DELAZARE, T. **Desnitrificação de esgoto Sanitário tratado a nível secundário através de biofiltros submersos utilizando comparativamente Metanol e Metano como fonte de Carbono.** 2004.174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

FORMIGONI, L. P. A., PEROVANO, T. G. **Avaliação da geração de energia através de subprodutos do tratamento de esgotos sanitários.** 2011. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

FRANÇA JÚNIOR, A. T. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto.** 2008. 148 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira , 2008.

FRARE, L. M., GIMENES, M. L., PEREIRA, N. C. **Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás.** Eng. Sanit. Ambiental. [online]. 2009, vol.14, n.2, pp. 167-172.

GONÇALVES, R. F. ; ARAÚJO, V. L. ; CHERNICHARO, C. A. **Tratamento Secundário de Esgoto Sanitário Através da Associação em Série de Reatores UASB e Biofiltros Aerados Submersos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., Foz do Iguaçu, 1997. **Anais.** Rio de Janeiro: ABES, 1997. p. 450-461.

ICLEI - Brasil - Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, efluentes urbanos.** Escritórios de projetos no Brasil, São Paulo, 2010.

INCROPERA, P. F.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1992. 455 p.

JORDÃO, E. P., PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgoto Doméstico. **Tratamento de Esgoto Doméstico.** 5ª ed. Rio de Janeiro, 2009.

LITTIG, V. S. **Geração de Energia Elétrica a partir do biogás produzido em Estações de Tratamento de Esgoto.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso do

Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo – Vitória, 2011.

LUIZ, F.A.R. **Desempenho de reatores anaeróbios de leito fixo no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro.** 2007. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

MELLO, J.C.O.; ANDRADE CANELLAS CONSULTORIA E ENGENHARIA LTDA. **Geração de eletricidade a partir de biomassa e biogás.** Minuta do Termo de Referência TR8. São Paulo: Comissão Especial de Bioenergia de Estado de São Paulo - CEBE, 2007. 75p.

MENDES, D. H. **Utilização do biogás para a geração de energia elétrica e secagem de lodo de estação de tratamento de esgoto na indústria cervejeira.** 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté 2008.

METCALF, A.; EDDY, M. S. **Wastewater Engineering: Treatment, disposal, reuse.** 4. ed. New York: McGraw-Hill International Editions, 2003. 1819p.

MIKI, M. K. **Dilemas do UASB.** 2010. Revista DAE [on line]. 2010, n. 183, p. 25-37.

MITZLAFF, K. V. **Engines for biogas: theory, modification, econom. operation.** Deutsches Zentrum fur Entwicklungstechnologien – GATE in: Dt.Ges. fur Techn. Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Wiesbaden (Alemanha): Vieweg, 1988.

MONTE, M. M. **Contributo para o Estudo da Valorização Energética de biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais.** 2010. 178 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono.** 2009. 79 p. Trabalho de Conclusão de Curso do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos - São Carlos, 2009.

PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso.** 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PRATI, L. **Geração de Energia Elétrica a partir do biogás gerado por Biodigestores.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná – Curitiba, 2010.

SÁ, M. L. **Avaliação de Metodologias para a Quantificação da Emissão de Sulfeto de Hidrogênio Proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos.** In: Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo, 2004.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-Econômica e Ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da Vinhaça em tecnologias para geração de energia.** 2007. 219 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2007.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. **Estimativa do potencial de Geração de Energia Elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil.** 2005. Biomassa & Energia, 2005, v.2, n.1.

SILVA, A. L. B. **Comportamento da biomassa metanogênica de lodo de reator UASB tratando esgoto sanitário e lodo de descarte de biofiltros aerados submersos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.

SILVA, C.A.B.V. **Limpeza e Purificação de Biogás.** 2009. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2009.

SOUZA, C. L. **Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB.** 2010. 127 f. Dissertação (Especialização em Saneamento,

Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgotos - Um Manual para Regiões de Clima Quente**. Campina Grande: Epgraf, 1994. 240 p.

VELAZQUEZ, S.M.S.G., AVELAR, L.H.N., MARTINS, O.S., COSTA, D. F., GUARDABASSI, P. M., VARKULYA, A. J., PECORA, V. **Sistema de Purificação de Biogás de Esgoto para utilização em Microturbinas**. In: Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CLAGTEE), 5., São Pedro, 2003. Anais do V CLAGTEE, 2003. v. CD-ROM.

VERONEZ, F. A. **Desempenho de um reator UASB tratando esgoto sanitário e realizando concomitantemente o adensamento e a digestão do lodo de descarte de biofiltros aerados submersos**. 2001.151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UFES, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2001.

VERSIANI, B. M. **Desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais tratando esgotos sanitários do campus da UFRJ**. 2005. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do Tratamento de Esgotos**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v. 2, 1996. 211p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v. 1, 2005. 452 p.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

10 ANEXO

Anexo A – Monitoramento de biogás e esgoto

Dia	BIOGAS - l/min				ESGOTO - l/s			
	Bio_min	Bio_max	Bio_med	Bio_dp	Esg_min	Esg_max	Esg_med	Esg_dp
05/10/02	0,03	15,65	7,05	3,25	0,00	2,26	1,21	0,30
06/10/02	0,03	12,95	5,91	2,33	0,00	2,08	1,29	0,23
07/10/02	0,03	14,33	6,16	1,83	0,00	1,96	1,12	0,29
08/10/02	0,03	15,65	7,05	3,25	0,00	2,26	1,21	0,30
09/10/02	0,03	17,90	8,97	2,59	0,00	2,08	1,13	0,28
10/10/02	0,00	13,93	5,67	3,46	0,00	2,50	0,53	0,43
11/10/02	0,03	15,23	7,14	1,75	0,00	1,70	0,50	0,30
12/10/02	0,00	14,43	4,62	2,50	0,00	1,51	0,52	0,28
13/10/02	0,03	13,78	6,19	2,21	0,00	2,50	0,42	0,30
14/10/02	0,00	17,70	5,91	2,75	0,00	2,50	0,49	0,47
15/10/02	0,00	14,43	4,80	2,79	0,00	2,12	0,95	0,54
16/10/02	0,00	19,78	1,95	1,27	0,00	2,04	1,00	0,36
17/10/02	0,03	15,08	3,24	2,57	0,00	1,82	1,09	0,22
18/10/02	0,03	14,30	2,63	1,92	0,00	1,70	1,02	0,25
19/10/02	0,03	8,63	4,58	1,40	0,00	1,60	0,88	0,25
20/10/02	0,03	11,78	5,51	1,43	0,00	1,77	1,09	0,21
21/10/02	0,00	17,93	5,08	1,71	0,00	1,83	0,99	0,30
22/10/02	0,03	14,40	4,72	1,40	0,00	1,55	0,92	0,23
23/10/02	0,00	5,20	1,20	1,27	0,07	1,64	0,99	0,25
24/10/02	0,03	8,90	2,07	1,66	0,00	1,62	0,91	0,27
25/10/02	0,00	10,30	3,93	1,45	0,00	1,88	1,00	0,38
26/10/02	0,03	8,48	2,28	1,29	0,00	1,83	1,01	0,27
27/10/02	0,03	4,75	1,83	0,53	0,00	1,68	0,97	0,24
28/10/02	0,03	11,15	1,82	0,86	0,00	1,66	0,92	0,23
29/10/02	0,03	2,98	1,19	0,47	0,00	1,86	0,94	0,25
30/10/02	0,00	13,35	1,32	0,89	0,00	1,91	1,00	0,27
02/11/02	0,00	8,00	1,31	0,77	0,00	1,67	0,92	0,22
03/11/02	0,02	10,95	2,17	1,02	0,00	1,90	0,97	0,23
04/11/02	0,00	10,35	2,12	0,89	0,00	2,34	0,97	0,26
05/11/02	0,00	6,10	1,06	1,09	0,00	1,66	0,91	0,20
14/11/02	0,02	2,50	0,82	0,33	0,00	1,78	0,98	0,30
15/11/02	0,02	1,60	0,80	0,25	0,00	1,54	0,66	0,24
16/11/02	0,02	1,72	0,71	0,25	0,00	1,36	0,50	0,22
17/11/02	0,02	1,70	0,69	0,27	0,00	1,13	0,42	0,21
18/11/02	0,00	2,07	0,68	0,30	0,00	2,14	0,57	0,30

Dia	BIOGAS - l/min				ESGOTO - l/s			
	Bio_min	Bio_max	Bio_med	Bio_dp	Esg_min	Esg_max	Esg_med	Esg_dp
19/11/02	0,00	1,30	0,27	0,25	0,00	1,75	0,83	0,31
20/11/02	0,00	1,75	0,32	0,30	0,00	1,89	1,02	0,26
21/11/02	0,02	1,80	0,65	0,24	0,00	2,25	0,90	0,33
22/11/02	0,00	1,75	0,46	0,22	0,00	2,42	0,71	0,34
23/11/02	0,00	1,95	0,42	0,20	0,00	1,42	0,58	0,24
27/11/02	0,00	2,90	0,75	0,44	0,00	2,00	1,13	0,26
28/11/02	0,00	2,97	0,93	0,63	0,00	2,01	0,83	0,43
29/11/02	0,00	3,47	1,02	0,61	0,00	1,83	0,80	0,40
30/11/02	0,00	7,87	1,77	0,82	0,00	1,31	0,40	0,29
01/12/02	0,00	4,65	1,78	1,03	0,00	1,06	0,24	0,24
02/12/02	0,00	4,67	1,86	1,11	0,00	1,07	0,30	0,24
03/12/02	0,00	5,80	1,63	0,73	0,00	1,47	0,80	0,21
04/12/02	0,00	5,22	1,68	0,95	0,00	1,56	0,93	0,27
05/12/02	0,00	4,83	2,09	1,00	0,00	1,78	1,28	0,20
06/12/02	0,00	6,82	2,94	1,20	0,00	1,80	0,94	0,36
07/12/02	0,00	7,02	2,59	1,24	0,00	1,69	0,73	0,40
08/12/02	0,00	5,37	2,40	0,98	0,00	1,53	0,78	0,31
09/12/02	0,00	10,92	4,03	2,49	0,00	1,63	0,73	0,32
10/12/02	0,00	31,40	3,78	3,44	0,00	1,76	1,00	0,23
11/12/02	0,00	1,86	3,55	0,27	0,00	1,86	1,00	0,27
12/12/02	0,00	34,00	3,22	2,89	0,00	1,89	1,02	0,25

Dia	BIOGAS - l/min				ESGOTO - l/s			
	Bio_min	Bio_max	Bio_med	Bio_dp	Esg_min	Esg_max	Esg_med	Esg_dp
13/12/02	0,00	26,90	6,03	6,38	0,00	2,16	1,00	0,37
14/12/02	0,00	23,80	8,36	2,84	0,00	1,85	1,01	0,26
16/12/02	0,00	27,12	9,30	3,45	0,00	1,80	0,92	0,31
17/12/02	0,00	26,65	7,30	3,87	0,00	1,60	0,93	0,19
18/12/02	0,00	27,05	6,50	3,56	0,00	1,81	0,82	0,38
19/12/02	0,00	29,47	6,57	3,34	0,00	1,47	0,67	0,30
20/12/02	0,00	28,00	6,62	3,60	0,00	1,74	1,05	0,29
21/12/02	0,00	20,50	7,34	3,74	0,00	1,97	1,07	0,47
08/01/03	0,02	16,45	6,86	2,27	0,00	1,87	0,99	0,30
09/01/03	0,02	20,07	6,16	2,80	0,00	1,52	0,71	0,24
10/01/03	0,02	27,55	6,60	3,35	0,00	1,83	0,88	0,32
11/01/03	0,02	22,97	6,53	3,06	0,00	1,70	0,87	0,24
12/01/03	0,02	19,90	7,36	2,61	0,00	1,60	0,89	0,26
13/01/03	0,02	20,65	5,35	3,07	0,00	2,22	0,82	0,31
14/01/03	0,65	15,20	3,48	2,29	0,00	1,49	0,69	0,24
15/01/03	0,02	12,97	2,92	1,82	0,00	1,84	0,90	0,24
16/01/03	0,00	19,77	3,44	2,30	0,00	2,15	1,00	0,27
17/01/03	0,02	26,45	4,65	2,94	0,00	2,08	1,02	0,29
18/01/03	0,02	22,45	6,26	2,88	0,00	1,86	1,04	0,26
19/01/03	0,02	21,57	6,90	2,85	0,00	1,99	1,06	0,29
20/01/03	0,02	19,35	6,57	2,61	0,00	2,00	1,09	0,31
21/01/03	0,02	29,02	6,37	2,97	0,00	1,70	0,80	0,27
22/01/03	0,02	21,02	6,64	2,33	0,00	1,74	0,89	0,28
23/01/03	0,02	33,17	8,29	4,24	0,00	2,08	0,68	0,24
26/01/03	0,02	31,92	7,01	4,18	0,00	2,09	0,83	0,29
27/01/03	2,40	27,97	8,82	3,10	0,00	1,91	0,90	0,29
28/01/03	0,02	28,77	5,79	3,19	0,00	1,52	0,80	0,21

Dia	BIOGAS - l/min				ESGOTO - l/s			
	Bio_min	Bio_max	Bio_med	Bio_dp	Esg_min	Esg_max	Esg_med	Esg_dp
29/01/03	0,00	21,30	3,64	2,35	0,00	1,59	0,84	0,20
30/01/03	0,40	18,82	3,86	2,40	0,16	1,71	0,96	0,23
31/01/03	0,02	22,95	4,13	2,85	0,00	1,71	1,02	0,26
01/02/03	0,02	19,45	3,41	1,62	0,00	1,44	0,49	0,20
02/02/03	0,02	1,87	2,56	1,15	0,00	1,14	0,45	0,22
03/02/03	0,00	27,15	2,22	2,21	0,00	2,50	0,59	0,34
04/02/03	0,02	23,57	3,63	2,58	0,00	1,56	0,80	0,20
05/02/03	0,02	21,50	3,78	2,34	0,00	1,76	0,94	0,23
06/02/03	0,35	23,30	4,07	2,58	0,00	1,67	0,90	0,27
07/02/03	0,00	21,27	3,56	2,80	0,00	2,07	0,99	0,28
08/02/03	0,02	21,82	4,28	2,30	0,00	1,56	0,99	0,18
09/02/03	0,02	15,30	4,22	2,09	0,00	1,73	1,01	0,19
10/02/03	0,00	29,27	3,48	2,97	0,00	1,69	0,94	0,28
11/02/03	0,02	30,25	3,53	2,97	0,00	1,45	0,79	0,27
12/02/03	0,02	23,27	3,86	2,86	0,00	1,78	1,00	0,27
13/02/03	0,02	27,05	4,15	3,27	0,00	1,52	0,84	0,18
14/02/03	0,02	28,15	4,29	3,07	0,00	2,50	0,99	0,23
15/02/03	0,02	23,95	5,02	2,90	0,00	1,73	1,00	0,19
16/02/03	0,02	20,87	3,19	2,28	0,00	1,70	0,41	0,49
17/02/03	0,02	22,32	2,87	2,15	0,00	1,53	0,51	0,48
18/02/03	0,87	19,80	4,01	2,33	0,55	1,72	0,99	0,09
19/02/03	0,00	26,27	3,67	2,97	0,00	1,68	0,99	0,39
20/02/03	0,00	13,82	1,80	2,34	0,00	1,39	0,59	0,49
21/02/03	0,02	17,10	3,64	2,25	0,00	1,80	1,07	0,17
22/02/03	1,30	17,25	4,37	2,15	0,46	1,86	1,01	0,11
23/02/03	0,02	20,22	4,47	2,35	0,00	1,50	1,04	0,09
24/02/03	0,02	17,00	4,14	2,13	0,00	1,72	1,06	0,17
25/02/03	0,02	16,42	4,10	2,16	0,00	1,70	1,08	0,10
26/02/03	0,02	15,27	4,21	2,04	0,00	1,81	1,07	0,15
27/02/03	0,02	19,02	4,59	2,59	0,00	1,61	1,09	0,10
01/03/03	0,02	15,42	4,12	1,29	0,00	1,30	0,61	0,11
02/03/03	0,02	15,40	3,30	1,09	0,00	1,00	0,42	0,16
03/03/03	0,02	6,00	2,58	0,76	0,00	1,05	0,28	0,18
04/03/03	0,02	4,77	2,13	0,77	0,00	1,60	0,21	0,22
05/03/03	0,00	6,35	1,16	1,08	0,00	1,40	0,09	0,20
06/03/03	0,00	10,87	2,39	1,15	0,00	1,27	0,50	0,20
07/03/03	0,02	25,92	2,77	1,73	0,00	1,73	0,80	0,22
08/03/03	0,02	16,20	3,10	1,74	0,00	1,41	0,76	0,14
09/03/03	0,02	22,10	3,27	1,89	0,00	1,60	0,85	0,15
10/03/03	0,00	19,50	2,97	1,75	0,00	1,67	0,87	0,23
11/03/03	0,02	19,80	3,58	1,98	0,00	1,55	0,96	0,10
12/03/03	0,02	17,60	3,29	1,86	0,00	1,60	0,92	0,15
13/03/03	0,20	16,27	3,40	1,63	0,51	1,64	0,95	0,12
14/03/03	0,02	25,70	3,55	2,30	0,00	1,56	0,88	0,28
15/03/03	0,02	26,10	3,93	2,18	0,00	1,64	0,92	0,13
16/03/03	0,02	16,40	3,68	1,74	0,00	1,45	0,89	0,10
17/03/03	0,45	19,00	3,75	2,20	0,19	1,37	0,91	0,11
18/03/03	0,02	14,72	3,60	1,98	0,00	1,56	0,99	0,17
19/03/03	0,00	14,70	3,20	1,99	0,42	1,50	0,95	0,12
20/03/03	0,00	15,30	2,73	2,35	0,00	1,66	0,93	0,15
22/03/03	0,00	22,45	3,37	2,70	0,00	1,61	0,94	0,15
23/03/03	0,00	20,70	3,70	2,30	0,00	1,57	0,96	0,12
24/03/03	0,00	20,93	3,20	2,09	0,00	1,49	0,98	0,14
25/03/03	0,02	17,30	3,38	2,00	0,00	1,83	1,00	0,13

Dia	BIOGAS - l/min				ESGOTO - l/s			
	Bio_min	Bio_max	Bio_med	Bio_dp	Esg_min	Esg_max	Esg_med	Esg_dp
26/03/03	0,02	16,90	2,75	2,21	0,00	1,59	1,03	0,17
27/03/03	0,02	16,35	3,20	2,07	0,00	1,80	0,99	0,14
28/03/03	0,02	17,07	3,21	2,18	0,00	1,54	0,97	0,13
29/03/03	0,02	15,40	4,27	2,12	0,00	1,85	0,96	0,17
30/03/03	0,02	19,95	4,06	2,46	0,00	1,54	0,97	0,14
31/03/03	0,02	20,55	5,64	2,24	0,00	1,85	0,96	0,17
01/04/03	0,00	18,35	3,25	2,33	0,33	1,66	0,96	0,13
02/04/03	0,02	29,77	3,43	2,50	0,00	1,66	0,99	0,15
03/04/03	0,02	18,70	4,06	2,40	0,00	1,74	0,99	0,13
04/04/03	0,42	22,97	3,95	2,40	0,00	1,52	0,99	0,16
05/04/03	0,02	19,50	4,34	2,37	0,00	1,48	0,97	0,13
06/04/03	0,02	21,20	4,43	2,13	0,00	1,90	0,98	0,15
07/04/03	0,00	19,12	3,20	2,38	0,00	1,60	0,99	0,21
08/04/03	0,02	20,62	3,03	2,43	0,00	1,61	1,00	0,16

Anexo B – Cromatogramas do Biogás Bruto e Lavado

Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\UFES165A.D

Sample Name: 200205.14387.1

BIOGAS PURO - UFES - 16/05/2002 - TESTE 1 -

Amostra 1

Injection Date : 16/05/2002 08:32:51

Sample Name : 200205.14387.1

Acq. Operator : EDGARD

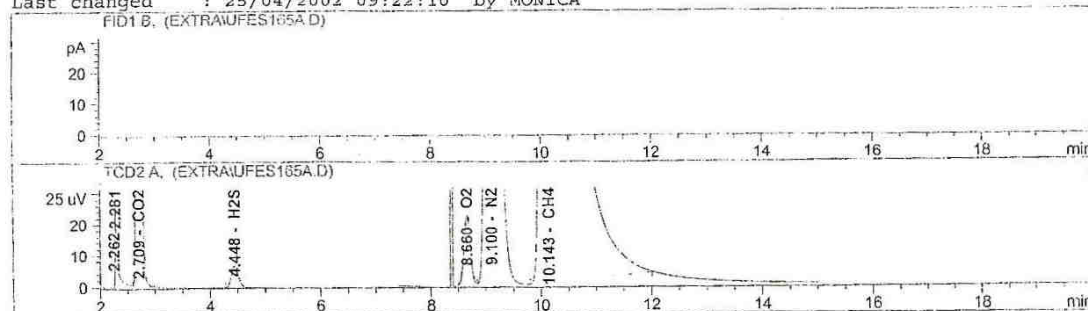
Vial : 1

Inj : 1

Inj Volume : Manually

Method : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M

Last changed : 25/04/2002 09:22:10 by MONICA



Normalized Percent Report

Sorted By : Signal
 Calib. Data Modified : 25/04/2002 07:57:17
 Multiplier : 1.0000
 Dilution : 1.0000

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.448	-	-	-	-	-	N-C4H10
6.851	-	-	-	-	-	N-C5H12
7.673	-	-	-	-	-	C6H6
9.123	-	-	-	-	-	C7H8
11.796	-	-	-	-	-	C8H10

Totals : 0.000000

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.709	BB +	2209.86182	1.96440e-3	4.348016	-	CO2
2.962	-	-	-	-	-	C2H4
3.173	-	-	-	-	-	C2H6
3.495	-	-	-	-	-	C2H2
4.448	BB	61.98263	2.49990e-3	0.155199	-	H2S
6.307	-	-	-	-	-	C3H8
8.068	-	-	-	-	-	H2
8.660	PV	183.80255	8.40823e-4	0.154793	-	O2
9.100	VB	6955.76270	1.39643e-3	9.728853	-	N2
10.143	PB	3.37959e4	2.52918e-3	85.613139	-	CH4
10.961	-	-	-	-	-	CO

Totals : 100.000000

Results obtained with enhanced integrator!

1 Warnings or Errors :

Warning : Calibrated compound(s) not found

Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\UFES165B.D

Sample Name: 200205.14387.1

BIOGAS CIRCULADO - UFES - 16/05/2002 - TESTE 1

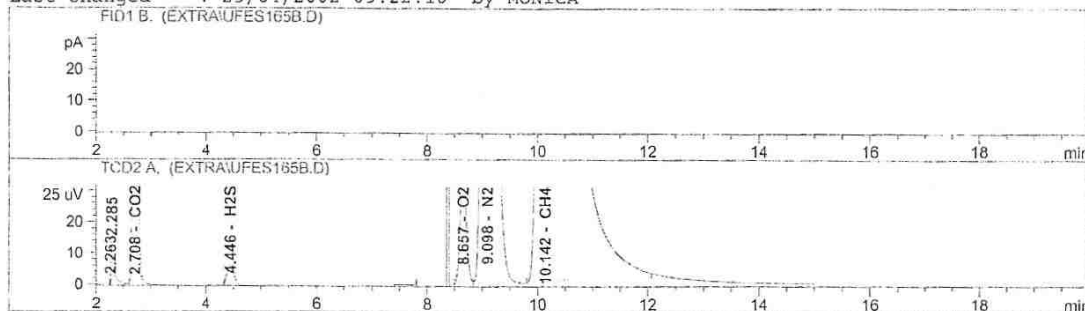
Amostra 2

```

=====
Injection Date   : 16/05/2002 08:51:39
Sample Name     : 200205.14387.1
Acq. Operator   : EDGARD
Vial            : 1
Inj             : 1
Inj Volume      : Manually

Method          : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
Last changed    : 25/04/2002 09:22:10 by MONICA

```



```

=====
Normalized Percent Report
=====

```

```

Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 25/04/2002 07:57:17
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000

```

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.446	-	-	-	-	-	N-C4H10
6.849	-	-	-	-	-	N-C5H12
7.671	-	-	-	-	-	C6H6
9.121	-	-	-	-	-	C7H8
11.792	-	-	-	-	-	C8H10

Totals : 0.000000

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.708	PB +	2244.61255	1.96440e-3	4.396531	-	CO2
2.961	-	-	-	-	-	C2H4
3.172	-	-	-	-	-	C2H6
3.494	-	-	-	-	-	C2H2
4.446	PB	62.84418	2.49990e-3	0.156649	-	H2S
6.306	-	-	-	-	-	C3H8
8.066	-	-	-	-	-	H2
8.657	BV	282.87323	8.40823e-4	0.237157	-	O2
9.098	BV	7591.07227	1.39643e-3	10.569703	-	N2
10.142	PB	3.35627e4	2.52918e-3	84.639960	-	CH4
10.958	-	-	-	-	-	CO

Totals : 100.000000

Results obtained with enhanced integrator!

1 Warnings or Errors :

Warning : Calibrated compound(s) not found

Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\GAS2611A.D

Sample Name: 200311.0.1

AMOSTRA EXTRA - GAS COMPRESSOR - 16:10 HS - 26/1/2003

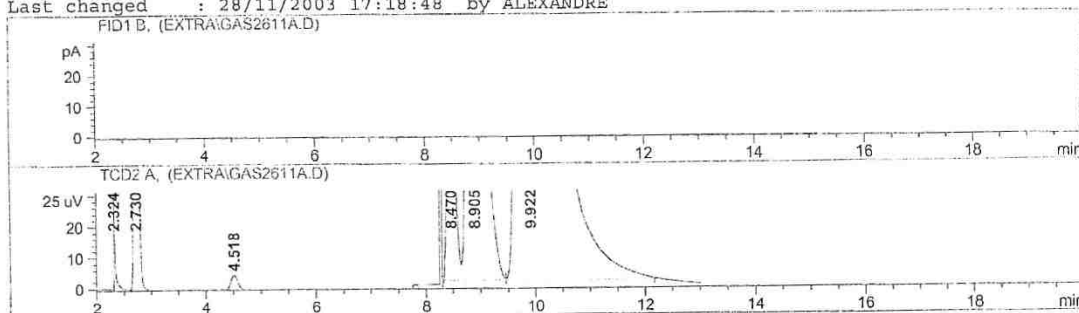
Amostra 3

```

=====
Injection Date   : 26/11/2003 16:21:02
Sample Name     : 200311.0.1
Acq. Operator   : LUCIANO
Vial            : 1
Inj             : 1
Inj Volume      : Manually

Acq. Method     : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
Last changed    : 19/11/2003 10:56:52 by LUCIANO
Analysis Method : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
Last changed    : 28/11/2003 17:18:48 by ALEXANDRE
=====

```



```

=====
Normalized Percent Report
=====

```

```

Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 28/11/2003 17:18:04
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000

```

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.243	-	-	-	-	-	N-C4H10
6.470	-	-	-	-	-	C5H12
7.420	-	-	-	-	-	C6H6
8.832	-	-	-	-	-	C7H8
11.476	-	-	-	-	-	C8H10

Totals : 0.000000

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.730	PB +	1315.12317	2.09196e-3	2.785937	-	CO2
2.989	-	-	-	-	-	C2H4
3.206	-	-	-	-	-	C2H6
3.535	-	-	-	-	-	C2H2
4.518	BB	44.48560	1.91300e-3	0.086176	-	H2S
6.411	-	-	-	-	-	C3H8
7.922	-	-	-	-	-	H2
8.470	BV	892.10388	1.73300e-3	1.565542	-	O2
8.905	VV	4974.69189	1.82801e-3	9.208646	-	N2
9.922	VB	3.33830e4	2.55449e-3	86.353699	-	CH4
10.857	-	-	-	-	-	CO

Totals : 100.000000

Results obtained with enhanced integrator!

2 Warnings or Errors :



LABORATÓRIO DA COQUERIA (IGC – P)

Amostra 4

AMOSTRAS EXTRAS BIOGÁS

Att. :

Produto : BIOGÁS (11/07/2003)

ELEMENTOS (%)	BIOGÁS (Selo Hidráulico)	COMPRESSOR	RESERVATÓRIO
CO ₂	4,776 / 4,775	1,695 / 1,694	1,791 / 1,791
O ₂	1,134 / 1,135	1,515 / 1,513	0,867 / 0,869
N ₂	12,675 / 12,667	16,358 / 16,359	11,566 / 11,571
CH ₄ (Metano)	81,227 / 81,229	80,431 / 80,434	85,775 / 85,769
H ₂ S	0,188 / 0,194	0,00 / 0,00	0,00 / 0,00

Obs: Amostras recebidas em 11/07/2003 às 15:00 horas.

DATA: 11/07/2003



LABORATÓRIO DA COQUERIA (IGC – P)

Amostra 5

BOLETIM DE ANÁLISE

Att. : Jorge Adelino

Produto : Gás Metano

Local : Compressor/Sacão

ELEMENTOS (%)	BIOGÁS BRUTO	RESERVATÓRIO
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	0,087	0,00
Dióxido Carbono (CO ₂)	2,816	2,434
Oxigênio (O ₂)	1,593	2,037
Nitrogênio (N ₂)	8,808	10,488
Metano (CH ₄)	86,696	85,014

Obs: Recebido e analisado em 27/11/2003

Data: 28/11//2003

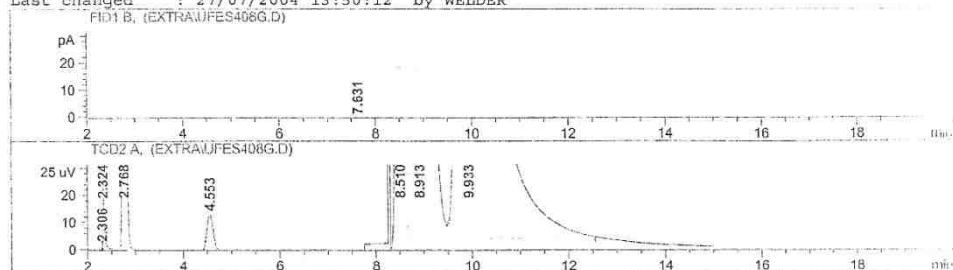
Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\UFES408G.D

Sample Name: 200407.0.1

AMOSTRA ESPECIAL (UFES) BIOGÁS PURO 03/08 (2004)

Amostra 6

Injection Date : 04/08/2004 10:11:52
 Sample Name : 200407.0.1 Vial : 1
 Acq. Operator : WELDER Inj : 1
 Inj Volume : Manually
 Method : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
 Last changed : 27/07/2004 13:50:12 by WELDER



=====

Normalized Percent Report

=====

Sorted By : Signal
 Calib. Data Modified : Tuesday, 27 27e July 27e 2004 13:38:53
 Multiplier : 1.0000
 Dilution : 1.0000

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.454	-	-	-	-	-	N-C4H10
6.676	-	-	-	-	-	N-C5H12
7.631	PP	8.49107	6.28790e-4	0.005204	-	C6H6 em Gás
9.046	-	-	-	-	-	C7H8 em Gás
11.478	-	-	-	-	-	C8H10 em Gás

Totals : 5.20436e-3

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.768	PB +	1814.33728	2.01790e-3	3.568753	-	CO2
3.028	-	-	-	-	-	C2H4
3.246	-	-	-	-	-	C2H6
3.575	-	-	-	-	-	C2H2
4.553	BB	122.55277	2.59330e-3	0.309796	-	H2S
6.476	-	-	-	-	-	C3H8
7.977	-	-	-	-	-	H2
8.510	BV	2416.49316	2.27354e-3	5.355355	-	O2
8.913	VV	1.41034e4	1.90216e-3	26.150007	-	N2
9.933	VB	2.47070e4	2.68278e-3	64.610884	-	CH4
10.747	-	-	-	-	-	CO

Totals : 99.994796

Results obtained with enhanced integrator!

2 Warnings or Errors :

Warning : Calibration warnings (see calibration table listing)

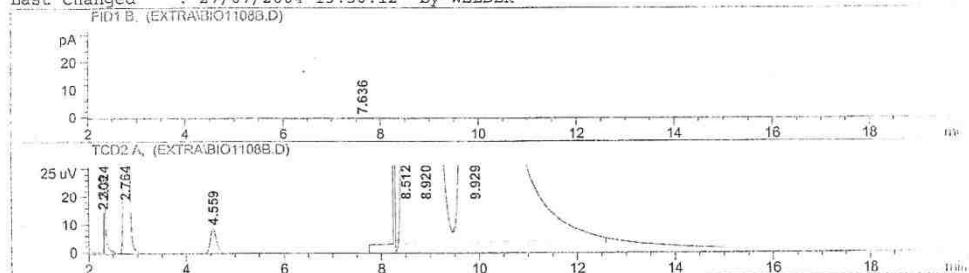
Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\BIO1108B.D

Sample Name: 200407.0.

AMOSTRA BIOGAS PURO 4

Amostra 7

Injection Date : 11/08/2004 14:31:04
 Sample Name : 200407.0.1
 Acq. Operator : AGEU
 Vial : 1
 Inj : 1
 Inj Volume : Manually
 Method : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
 Last changed : 27/07/2004 13:50:12 by WELDER



Normalized Percent Report

Sorted By : Signal
 Calib. Data Modified : Tuesday, 27 27e July 27e 2004 13:38:53
 Multiplier : 1.0000
 Dilution : 1.0000

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.443		-	-	-		N-C4H10
6.665		-	-	-		N-C5H12
7.636	PB	10.14871	6.28790e-4	0.006147		C6H6 em Gás
9.031		-	-	-		C7H8 em Gás
11.458		-	-	-		C8H10 em Gás

Totals : 6.14674e-3

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.764	PB +	3707.89990	2.01790e-3	7.207014		CO2
3.023		-	-	-		C2H4
3.241		-	-	-		C2H6
3.569		-	-	-		C2H2
4.559	BB	83.38041	2.59330e-3	0.208279		H2S
6.465		-	-	-		C3H8
7.963		-	-	-		H2
8.512	BV	2105.64771	2.27354e-3	4.611236		O2
8.920	VV	9925.06152	1.90216e-3	18.184833		N2
9.929	VB	2.70043e4	2.68278e-3	69.782492		CH4
10.728		-	-	-		CO

Totals : 99.993853

Results obtained with enhanced integrator!

2 Warnings or Errors :

Warning : Calibration warnings (see calibration table listing)
 Warning : Calibrated compound(s) not found

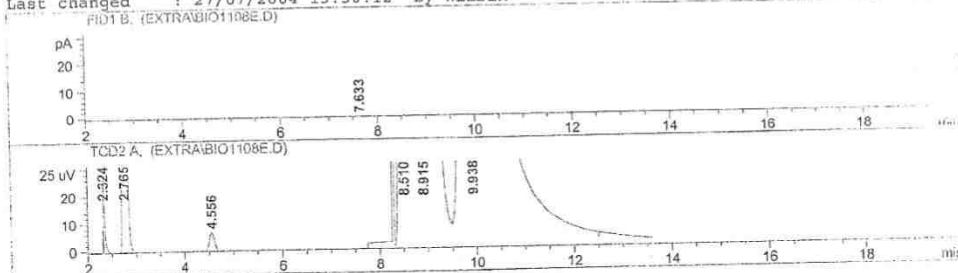
Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\BIO1108E.D

Sample Name: 200407 0.1

AMOSTRA BIOGAS PURO 03

Amostra 8

Injection Date : 11/08/2004 15:21:58 Vial : 1
 Sample Name : 200407.0.1 Inj : 1
 Acq. Operator : AGEU Inj Volume : Manually
 Method : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
 Last changed : 27/07/2004 13:50:12 by WELDER



Normalized Percent Report

Sorted By : Signal
 Calib. Data Modified : Tuesday, 27 27e July 27e 2004 13:38:53
 Multiplier : 1.0000
 Dilution : 1.0000

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.447	-	-	-	-	-	N-C4H10
6.669	-	-	-	-	-	N-C5H12
7.633	BP	8.34578	6.28790e-4	0.005107	-	C6H6 em Gás
9.037	-	-	-	-	-	C7H8 em Gás
11.466	-	-	-	-	-	C8H10 em Gás

Totals : 5.10698e-3

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.765	PB +	3123.76489	2.01790e-3	6.134357	-	CO2
3.025	-	-	-	-	-	C2H4
3.243	-	-	-	-	-	C2H6
3.572	-	-	-	-	-	C2H2
4.556	BB	72.31881	2.59330e-3	0.182514	-	H2S
6.470	-	-	-	-	-	C3H8
7.968	-	-	-	-	-	H2
8.510	BV	3554.92505	2.27354e-3	7.865482	-	O2
8.915	VV	1.41044e4	1.90216e-3	26.109238	-	N2
9.938	VB	2.28676e4	2.68278e-3	59.703302	-	CH4
10.735	-	-	-	-	-	CO

Totals : 99.994893

Results obtained with enhanced integrator!

2 Warnings or Errors :

Warning : Calibration warnings (see calibration table listing)
 Warning : Calibrated compound(s) not found

HP3 11/08/2004 15:35:51 AGEU

Page 1 of 2

Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\UFE0506A.D

Sample Name: 200206.37:1

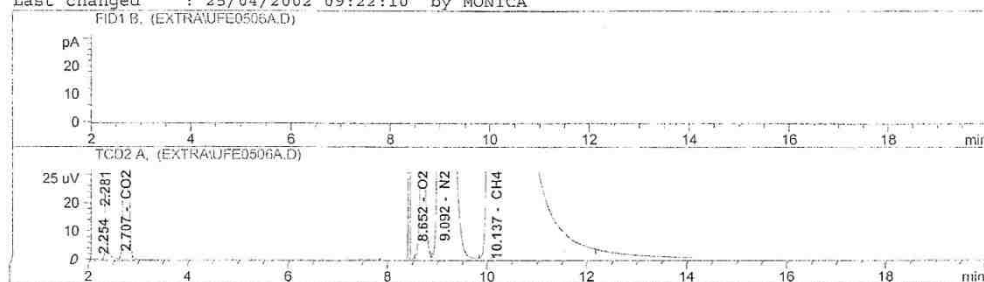
AMOSTRA EXTRA - UFES - 05/06/2002 - BIOGAS - 04/06/2002

Amostra 1

```

=====
Injection Date : 05/06/2002 14:38:05
Sample Name    : 200206.371.1
Acq. Operator  : Mônica
Vial           : 1
Inj            : 1
Inj Volume     : Manually
Method         : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
Last changed   : 25/04/2002 09:22:10 by MONICA

```



```

=====
Normalized Percent Report
=====

```

```

Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 25/04/2002 07:57:17
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000

```

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.443	-	-	-	-	-	N-C4H10
6.846	-	-	-	-	-	N-C5H12
7.667	-	-	-	-	-	C6H6
9.116	-	-	-	-	-	C7H8
11.786	-	-	-	-	-	C8H10

Totals : 0.000000

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.707	BB +	1640.53467	1.96440e-3	3.210274	-	CO2
2.960	-	-	-	-	-	C2H4
3.171	-	-	-	-	-	C2H6
3.493	-	-	-	-	-	C2H2
4.388	-	-	-	-	-	H2S
6.302	-	-	-	-	-	C3H8
8.062	-	-	-	-	-	H2
8.652	PV	345.30228	8.40823e-4	0.289222	-	O2
9.092	VB	8290.72949	1.39643e-3	11.532948	-	N2
10.137	PB	3.37245e4	2.52918e-3	84.967556	-	CH4
10.953	-	-	-	-	-	CO

Totals : 100.000000

Results obtained with enhanced integrator!

1 Warnings or Errors :

Warning : Calibrated compound(s) not found

Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\GAS2611B.D

Sample Name: 200311.0.1

AMOSTRA EXTRA - - 16:30 HS - 26/1/2003

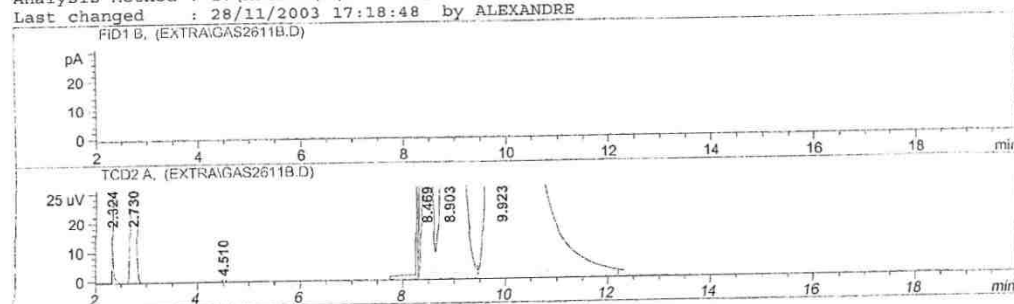
Amostra 2

```

=====
Injection Date : 26/11/2003 16:35:37
Sample Name    : 200311.0.1
Acq. Operator  : LUCIANO
Vial           : 1
Inj            : 1
Inj Volume     : Manually

Acq. Method    : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
Last changed   : 19/11/2003 10:56:52 by LUCIANO
Analysis Method: C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
Last changed   : 28/11/2003 17:18:48 by ALEXANDRE
=====

```



```

=====
Normalized Percent Report
=====

```

```

Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 28/11/2003 17:18:04
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000

```

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.243	-	-	-	-	-	N-C4H10
6.470	-	-	-	-	-	C5H12
7.420	-	-	-	-	-	C6H6
8.832	-	-	-	-	-	C7H8
11.476	-	-	-	-	-	C8H10

```
Totals : 0.000000
```

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.730	BB +	1141.11487	2.09196e-3	2.406411	-	CO2
2.989	-	-	-	-	-	C2H4
3.206	-	-	-	-	-	C2H6
3.535	-	-	-	-	-	C2H2
4.510	BB	14.00462	1.91300e-3	-	-	H2S
6.411	-	-	-	-	-	C3H8
7.922	-	-	-	-	-	H2
8.469	BV	1145.20203	1.73300e-3	2.000632	-	O2
8.903	VV	5945.52881	1.82801e-3	10.956093	-	N2
9.923	VB	3.28571e4	2.55449e-3	84.609858	-	CH4
10.857	-	-	-	-	-	CO

```
Totals : 100.000000
```

Results obtained with enhanced integrator!

2 Warnings or Errors :



LABORATÓRIO DA COQUERIA (IGC - P)

Amostra 3

AMOSTRAS EXTRAS BIOGÁS

Att. :

Produto : BIOGÁS (11/07/2003)

ELEMENTOS (%)	BIOGÁS (Selo Hidráulico)	COMPRESSOR	SACÃO
CO2	4,776 / 4,775	1,695 / 1,694	1,791 / 1,791
O2	1,134 / 1,135	1,515 / 1,513	0,867 / 0,869
N2	12,675 / 12,667	16,358 / 16,359	11,566 / 11,571
CH4 (Metano)	81,227 / 81,229	80,431 / 80,434	85,775 / 85,769
H2S	0,188 / 0,194	0,00 / 0,00	0,00 / 0,00

Obs: Amostras recebidas em 11/07/2003 às 15:00 horas.

DATA: 11/07/2003



LABORATÓRIO DA COQUERIA (IGC – P)

Amostra 4

BOLETIM DE ANÁLISE

Atendimento Técnico : Jorge Adelino

Produto : Gás Metano

Local : Compressor/Sacção

ELEMENTOS (%)	BIOGÁS BRUTO	RESERVATÓRIO
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	0,087	0,00
Dióxido Carbono (CO ₂)	2,816	2,434
Oxigênio (O ₂)	1,593	2,037
Nitrogênio (N ₂)	8,808	10,488
Metano (CH ₄)	86,696	85,014

Obs: Recebido e analisado em 27/11/2003

Data: 28/11//2003

Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\UFES408D.D

Sample Name: 200407.0.1

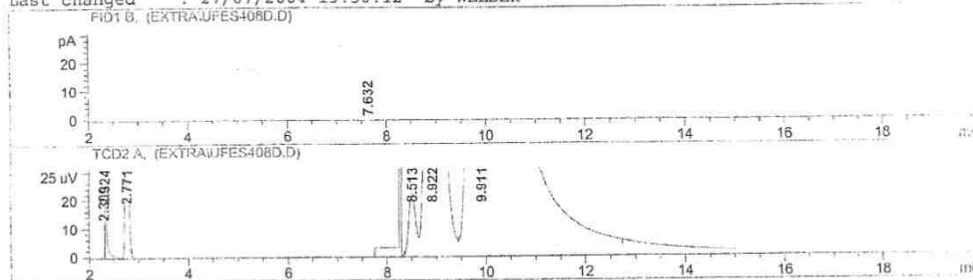
AMOSTRA ESPECIAL (UFES) RESERVATORIO 02 03/08 (2004)

Amostra 5

```

=====
Injection Date   : 04/08/2004 09:18:58
Sample Name     : 200407.0.1
Acq. Operator   : WELDER
Vial            : 1
Inj             : 1
Inj Volume      : Manually
Method          : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
Last changed    : 27/07/2004 13:50:12 by WELDER
=====

```



```

=====
Normalized Percent Report
=====

```

```

Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : Tuesday, 27 27e July 27e 2004 13:38:53
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000

```

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.461		-	-	-		N-C4H10
6.683		-	-	-		N-C5H12
7.632	BB	5.27778	6.28790e-4	0.003128		C6H6 em Gás
9.056		-	-	-		C7H8 em Gás
11.491		-	-	-		C8H10 em Gás

Totals : 3.12794e-3

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.771	EB +	378.84451	2.01790e-3	0.720546		CO2
3.031		-	-	-		C2H4
3.250		-	-	-		C2H6
3.579		-	-	-		C2H2
4.499		-	-	-		H2S
6.484		-	-	-		C3H8
7.985		-	-	-		H2
8.513	BV	203.76234	2.27354e-3	0.436645		O2
8.922	VV	5977.84521	1.90216e-3	10.717513		N2
9.911	VB	3.48496e4	2.68278e-3	88.122168		CH4
10.758		-	-	-		CO

Totals : 99.996872

Results obtained with enhanced integrator!

2 Warnings or Errors :

Warning : Calibration warnings (see calibration table listing)

HP3 04/08/2004 09:34:04 WELDER

Page 1 of 2

Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\BIO1108D.D

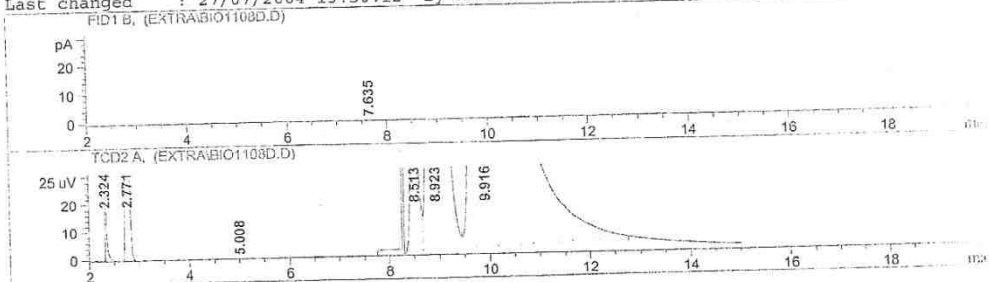
Sample Name: 200407.0

AMOSTRA BIOGAS LAVADO 3 RESERVATORIO

Amostra 6

Injection Date : 11/08/2004 15:05:59 Vial : 1
 Sample Name : 200407.0.1 Inj : 1
 Acq. Operator : AGEU Inj Volume : Manually

Method : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
 Last changed : 27/07/2004 13:50:12 by WELDER



Normalized Percent Report

Sorted By : Signal
 Calib. Data Modified : Tuesday, 27 27e July 27e 2004 13:38:53
 Multiplier : 1.0000
 Dilution : 1.0000

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.460	-	-	-	-	-	N-C4H10
6.682	-	-	-	-	-	N-C5H12
7.635	BB	8.70259	6.28790e-4	0.005210	-	C6H6 em Gás
9.055	-	-	-	-	-	C7H8 em Gás
11.489	-	-	-	-	-	C8H10 em Gás

Totals : 5.20951e-3

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.771	PB +	863.48682	2.01790e-3	1.658814	-	CO2
3.031	-	-	-	-	-	C2H4
3.249	-	-	-	-	-	C2H6
3.579	-	-	-	-	-	C2H2
4.499	-	-	-	-	-	H2S
6.482	-	-	-	-	-	C3H8
7.984	-	-	-	-	-	H2
8.513	BV	703.60297	2.27354e-3	1.522908	-	O2
8.923	VV	7146.23340	1.90216e-3	12.940998	-	N2
9.916	VB	3.28389e4	2.68278e-3	83.872071	-	CH4
10.756	-	-	-	-	-	CO

Totals : 99.994790

Results obtained with enhanced integrator!

2 Warnings or Errors :

Warning : Calibration warnings (see calibration table listing)
 Warning : Calibrated compound(s) not found

HP3 11/08/2004 15:21:16 AGEU

Page 1 of 2

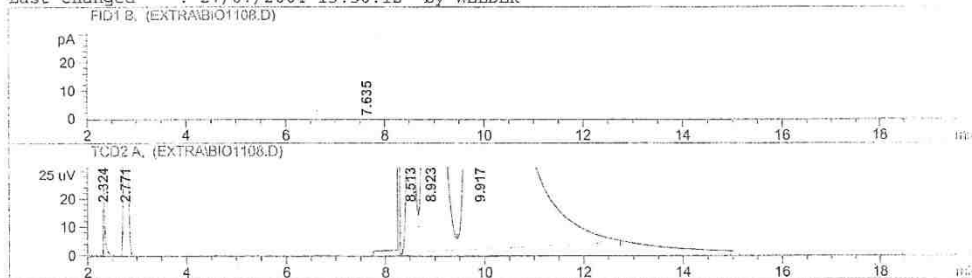
Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\BIO1108.D

Sample Name: 200407.0.1

AMOSTRA BIOGAS LAVADO

Amostra 7

Injection Date : 11/08/2004 14:48:47
 Sample Name : 200407.0.1 Vial : 1
 Acq. Operator : AGEU Inj : 1
 Inj Volume : Manually
 Method : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M
 Last changed : 27/07/2004 13:50:12 by WELDER



Normalized Percent Report

Sorted By : Signal
 Calib. Data Modified : Tuesday, 27 27e July 27e 2004 13:38:53
 Multiplier : 1.0000
 Dilution : 1.0000

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.460		-	-	-		N-C4H10
6.683		-	-	-		N-C5H12
7.635	BP	9.17238	6.28790e-4	0.005569		C6H6 em Gás
9.056		-	-	-		C7H8 em Gás
11.490		-	-	-		C8H10 em Gás

Totals : 5.56946e-3

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.771	PB +	845.42731	2.01790e-3	1.647406		CO2
3.031		-	-	-		C2H4
3.250		-	-	-		C2H6
3.579		-	-	-		C2H2
4.499		-	-	-		H2S
6.483		-	-	-		C3H8
7.985		-	-	-		H2
8.513	BV	730.04047	2.27354e-3	1.602786		O2
8.923	VV	7141.20459	1.90216e-3	13.117304		N2
9.917	VB	3.22801e4	2.68278e-3	83.626935		CH4
10.758		-	-	-		CO

Totals : 99.994431

Results obtained with enhanced integrator!

2 Warnings or Errors :

Warning : Calibration warnings (see calibration table listing)
 Warning : Calibrated compound(s) not found

Data File C:\HPCHEM\3\DATA\EXTRA\BIO1108F.D

Sample Name: 200407.0.

AMOSTRA BIOGAS LAVADO SELO HIDRICO LAVADO 2

Amostra 8

Injection Date : 11/08/2004 15:37:28

Sample Name : 200407.0.1

Acq. Operator : AGEU

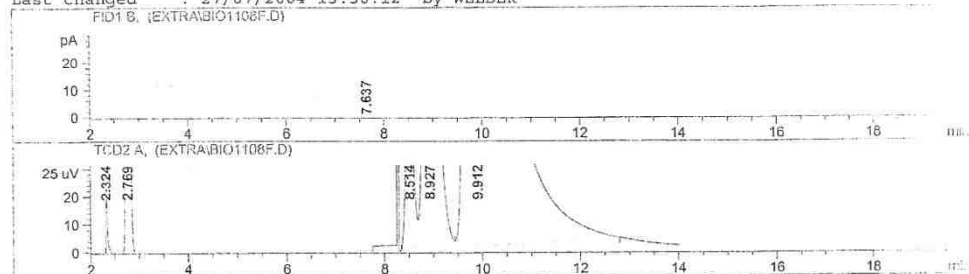
Vial : 1

Inj : 1

Inj Volume : Manually

Method : C:\HPCHEM\3\METHODS\COG.M

Last changed : 27/07/2004 13:50:12 by WELDER



Normalized Percent Report

Sorted By : Signal
 Calib. Data Modified : Tuesday, 27 27e July 27e 2004 13:38:53
 Multiplier : 1.0000
 Dilution : 1.0000

Signal 1: FID1 B,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
6.455	-	-	-	-	-	N-C4H10
6.677	-	-	-	-	-	N-C5H12
7.637	PP	7.64991	6.28790e-4	0.004537	-	C6H6 em Gás
9.047	-	-	-	-	-	C7H8 em Gás
11.479	-	-	-	-	-	C8H10 em Gás

Totals : 4.53692e-3

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: TCD2 A,

RetTime [min]	Type	Area [25 uV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
2.769	PB +	1597.30994	2.01790e-3	3.040099	-	CO2
3.028	-	-	-	-	-	C2H4
3.247	-	-	-	-	-	C2H6
3.576	-	-	-	-	-	C2H2
4.495	-	-	-	-	-	H2S
6.477	-	-	-	-	-	C3H8
7.977	-	-	-	-	-	H2
8.514	BV	782.04517	2.27354e-3	1.677006	-	O2
8.927	VV	3640.45386	1.90216e-3	6.531347	-	N2
9.912	VB	3.50727e4	2.68278e-3	88.747011	-	CH4
10.748	-	-	-	-	-	CO

Totals : 99.995463

Results obtained with enhanced integrator!

2 Warnings or Errors :

Warning : Calibration warnings (see calibration table listing)
 Warning : Calibrated compound(s) not found