

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**USP**

**Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia**

**PIPGE**

**IMPLANTAÇÃO DE UMA UNIDADE DEMONSTRATIVA DE GERAÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE TRATAMENTO DO ESGOTO  
RESIDENCIAL DA USP – ESTUDO DE CASO**

**Vanessa Pecora**

**São Paulo**

**2006**

**VANESSA PECORA**

**IMPLANTAÇÃO DE UMA UNIDADE DEMONSTRATIVA DE GERAÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE TRATAMENTO DO ESGOTO  
RESIDENCIAL DA USP – ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao Programa  
Interunidades de Pós-Graduação em Energia  
da Universidade de São Paulo (Instituto de  
Eletrotécnica e Energia / Escola Politécnica /  
Instituto de Física / Faculdade de Economia e  
Administração) para obtenção do título de  
Mestre em Energia.

Orientação: Prof. Dr. José Roberto Moreira

**São Paulo**

**2006**

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE .**

### **FICHA CATALOGRÁFICA**

Pecora, Vanessa.

Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP : estudo de caso /. Vanessa Pecora ; orientador José Roberto Moreira. São Paulo, 2006.

152 p. : il.; 30cm.

Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

1. Digestão anaeróbia 2. Biogás 3. fontes alternativas de energia I. Título.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, pela oportunidade que me deram para chegar até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Roberto Moreira, pela dedicação.

A Profa. Dra. Suani Teixeira Coelho, pela oportunidade.

Aos colegas do CENBIO, pela colaboração.

Aos amigos, pelo incentivo.

A minha família, pelo companheirismo, paciência e compreensão.

*Tenha equilíbrio e alegria.*

*Saiba ser reconhecido.*

*Procure ser humilde.*

*Saiba agradecer.*

**“Minutos de Sabedoria”**

## RESUMO

**PECORA, V. Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP – Estudo de Caso.** 2006. 152 p. Dissertação de Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo - PIPGE.

Alternativas energéticas por meio de fontes renováveis de energia têm sido objeto de pesquisas no mundo inteiro. Diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, além de encontrar soluções ambientalmente sustentáveis para colaborar com a matriz energética dos países e reduzir os impactos globais provocados pela queima dos mesmos, justificam o tema deste trabalho. Foram desenvolvidas duas metas demonstrativas pertencentes ao projeto Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas (PUREFA), que tiveram como objetivo a captação do biogás proveniente do tratamento do esgoto do Conjunto Residencial da Universidade de São Paulo (CRUSP), sua purificação e armazenamento, para posterior geração de energia elétrica, utilizando como tecnologia de conversão energética um motor ciclo Otto. Esta experiência é a base para o desenvolvimento deste trabalho incluindo a implementação da unidade piloto instalada no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) da USP e a análise dos resultados.

Palavras-chaves: digestão anaeróbia, biogás, energia renovável.

## **ABSTRACT**

**PECORA, V. Implementation of a Demonstrative Unit for Power Generation Trough Biogas Derived from Residential Sewage Treatment at University of São Paulo – Case Study.** 2006. 152 p. Master's Dissertation – Interunits Post Graduation Program on Energy of the University of São Paulo - PIPGE.

Energy alternatives, by means of renewable sources of energy, has been the object of many researches all over the world. To lessen the dependence on fossil fuels, besides finding environmentally sustainable solutions to collaborate with the energy matrix of the countries and to reduce the global impacts caused by the burning of fossil fuels justify the theme of this work. This dissertation is based on 2 demonstrative goals belonging to the project Program for the Rational Use of Energy and Alternative Sources (PUREFA), which aimed at the collection of biogas deriving from the sewage treatment of the Residential Complex of Sao Paulo University - USP (CRUSP), its purification and storage, for later power generation, making use of an Otto cycle engine as energy conversion technology. This experience is the foundation for the development of this work, including the implementation of the pilot unit installed in the Hydraulics Technological Center (CTH) of USP and the results analysis.

Key-words: anaerobic digestion, biogas, renewable energy.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produtos finais do processo de degradação anaeróbia.....	25
Tabela 2. Concentrações e fator de inibição do processo de fermentação. ....	26
Tabela 3: Propriedades físicas do metano, gás carbônico e gás sulfídrico.....	28
Tabela 4. Equivalência energética de 1 Nm <sup>3</sup> de biogás .....	30
Tabela 5. Número de distritos com tratamento de esgoto sanitário por tipo de sistema de tratamento. ....	33
Tabela 6. Resultados preliminares do desempenho de biodigestores modelo indiano e chinês, com capacidade de 5,5 m <sup>3</sup> de biomassa, operados com esterco bovino.....	39
Tabela 7. Relação entre a vazão de biogás consumido pela microturbina e a energia elétrica gerada pela mesma. ....	56
Tabela 8. Relação entre a vazão de biogás consumida pela microturbina e a energia elétrica líquida entregue à rede [microturbina – (compressor + secador a + secador b)]......	57
Tabela 9. Custo dos equipamentos, materiais e acessórios para a geração de energia elétrica, a partir do biogás de tratamento de esgoto, utilizando uma microturbina de 30 kW. ....	58
Tabela 10. Relação entre a vazão de biogás consumido pelo grupo-gerador e a energia elétrica gerada pelo mesmo.....	60
Tabela 11. Custo dos equipamentos, materiais e acessórios para a geração de energia elétrica, a partir do biogás de tratamento de esgoto, utilizando uma grupo gerador de 30 kW. ....	61
Tabela 12. Manutenção preventiva da microturbina.....	65
Tabela 13. Manutenção preventiva dos componentes do sistema de limpeza do biogás para a microturbina. ....	66
Tabela 14. Manutenção preventiva do grupo-gerador.....	68
Tabela 15. Comparação das emissões entre as tecnologias de conversão.....	86
Tabela 16. Níveis de carboxihemoglobina e efeitos relacionados à saúde. ....	88
Tabela 17. Resultado da primeira análise físico-química do biogás. ....	97
Tabela 18. Resultado da segunda análise físico-química do biogás. ....	98
Tabela 19. Resultado da análise do efluente antes do seu tratamento no biodigestor. ....	99

<b>Tabela 20. Resultado da análise do efluente após seu tratamento no biodigestor.....</b>	<b>100</b>
<b>Tabela 21. Descrição dos equipamentos da instalação.....</b>	<b>102</b>
<b>Tabela 22. Análise físico-química do biogás antes do sistema de purificação.....</b>	<b>106</b>
<b>Tabela 23. Análise físico-química do biogás após o sistema de purificação.....</b>	<b>106</b>
<b>Tabela 24. Cálculo teórico do volume de biogás gerado. ....</b>	<b>109</b>
<b>Tabela 25. Valores utilizados para cálculos. ....</b>	<b>110</b>
<b>Tabela 26. Descrição dos equipamentos da instalação.....</b>	<b>112</b>
<b>Tabela 27. Resultado das análises dos gases de exaustão do grupo motor-gerador.....</b>	<b>117</b>
<b>Tabela 28. Análise dos gases de exaustão do grupo motor-gerador do projeto ENERG-BIOG, instalado na Sabesp de Barueri.....</b>	<b>118</b>
<b>Tabela 29. Comparação dos resultados das análises dos gases de exaustão dos projetos ENERG-BIOG e PUREFA. ....</b>	<b>119</b>
<b>Tabela 30. Custo dos equipamentos.....</b>	<b>120</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do processo de decomposição anaeróbia.....	23
Figura 2. Relação entre o poder calorífico do biogás e porcentagem em volume de metano. .....	28
Figura 3. Peso específico do biogás (faixa de concentração-40 a 100% de $CH_4$ )......	29
Figura 4. Vista frontal, em corte, do biodigestor modelo indiano. ....	35
Figura 5. Vista tridimensional do biodigestor modelo indiano. ....	35
Figura 6. Vista frontal, em corte, do biodigestor modelo chinês.....	37
Figura 7. Vista tridimensional do biodigestor modelo chinês. ....	37
Figura 8. Biodigestor modelo rafa. ....	39
Figura 9. Turbina a gás.....	41
Figura 10. Esquemas de turbinas ciclo brayton. ....	42
Figura 11. Diagrama simplificado do ciclo brayton. ....	42
Figura 12. Componentes do sistema da microturbina. ....	44
Figura 13. Representação esquemática do funcionamento de um motor diesel. ....	45
Figura 14. Desenho esquemático do funcionamento de um motor otto.....	46
Figura 15. Instalação do projeto ENER-G-BIOG. ....	54
Figura 16. Consumo específico da microturbina.....	55
Figura 17. Aumento da temperatura global.....	75
Figura 18. Aumento da concentração de $CO_2$ , $CH_4$ e $N_2O$ . ....	76
Figura 19. Aumento no nível do mar nos últimos 300 anos.....	77
Figura 20. Principais fontes antropogênicas de metano e suas contribuições. ....	83
Figura 21. Simulação anual global do aumento da temperatura. ....	84
Figura 22. Biodigestor modelo uasb existente no CTH.....	92
Figura 23. Sistema de pré-tratamento do esgoto. ....	93
Figura 24. Caixa de areia. ....	93
Figura 25. Calha parshall. ....	94
Figura 26. Tanque de acumulação do esgoto. ....	94
Figura 27. Bomba que leva o efluente para o biodigestor.....	95
Figura 28. Fotos da coleta do biogás para análises realizadas pela COMGAS. ....	96
Figura 29. Alongamento da secção de captação do biogás. ....	97

<b>Figura 30. Primeiro fluxograma da instalação dos equipamentos.....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 31. Fotos da tubulação de biogás instalada.....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 32. Selo hidráulico. ....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 33. Fotos do sistema de purificação do biogás. ....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 34. Fotos da instalação do abrigo para o medidor de vazão de biogás. ....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 35. Totalizador da vazão de biogás instalado no abrigo de madeira.....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 36. Horímetro. ....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 37. Fluxograma atual da instalação dos equipamentos. ....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 38. Fotos da construção em alvenaria para abrigo dos equipamentos.....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 39. Fotos do medidor de pressão – manômetro em U. ....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 40. Grupo motor-gerador.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 41. Fotos do medidor e totalizador de vazão de biogás instalados no abrigo. ....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 42. Fotos do gasômetro: armazenador de biogás. ....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 43. Grupo motor-gerador com painel de teste.....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 44. Painel de comando do grupo motor-gerador.....</b>	<b>117</b>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE DO BIOGÁS .....</b>	<b>18</b>
2.1 HISTÓRICO DO BIOGÁS .....	18
2.2 FORMAÇÃO DO BIOGÁS .....	20
2.2.1 Aspectos Microbiológicos.....	20
2.2.1.1 Fatores que Influenciam a Geração de Biogás .....	24
2.2.2 Aspectos Físico-Químicos .....	26
<b>3. ASPECTOS TÉCNICOS .....</b>	<b>31</b>
3.1 TECNOLOGIAS APLICADAS À PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	31
3.1.1 Fluxo de Tratamento .....	32
3.1.1.1 Biodigestor Modelo Indiano.....	34
3.1.1.2 Biodigestor Modelo Chinês .....	36
3.1.1.3 Biodigestor Modelo RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente) .....	38
3.2 TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS PARA CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA .....	40
3.2.1 Turbinas a Gás .....	41
3.2.2 Turbinas de Ciclo Brayton .....	41
3.2.3 Microturbinas a Gás.....	43
3.2.4 Motores de Combustão Interna.....	44
3.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO .....	46
3.3.1 Tecnologias Disponíveis Comercialmente .....	46
<b>4. ASPECTOS ECONÔMICOS.....</b>	<b>48</b>
4.1 ASPECTOS ECONÔMICOS DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E DA SUA UTILIZAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	48
4.2 COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE AS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS.....	53
4.2.1 Geração de 30 kW (ISO) com uma Microturbina .....	54
4.2.2 Geração de 30 kW (ISO) com um Grupo Gerador.....	59
4.2.3 Custo de Operação e Manutenção dos Sistemas.....	63
4.2.3.1 Custo de Operação e Manutenção da Microturbina .....	63

4.2.3.2	Custo de Operação e Manutenção da Microturbina .....	67
4.3	RELAÇÃO DE CUSTOS ENTRE AS TECNOLOGIAS .....	69
4.4	CUSTO MÉDIO DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA PELA ETE DA SABESP EM BARUERI – SP.....	70
<b>5.</b>	<b>ASPECTOS SÓCIO-AMBIENTAIS.....</b>	<b>72</b>
5.1	O ESGOTO E SEUS IMPACTOS .....	72
5.2	ASPECTOS DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E SUAS INTERAÇÕES COM O MEIO AMBIENTE.....	73
5.2.1.	<i>Aquecimento Global e o Protocolo de Kyoto</i> .....	77
5.2.1.1	Créditos de Carbono .....	79
5.2.1.1.1	Cálculo dos Créditos de Carbono .....	80
5.3	ASPECTOS AMBIENTAIS DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA.....	81
5.4	ASPECTOS DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E SUAS INTERAÇÕES COM A SAÚDE .....	85
5.4.1	<i>Principais Fontes Poluidoras e seus Efeitos à Saúde</i> .....	87
5.5	ASPECTOS SOCIAIS DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA.....	90
<b>6.</b>	<b>ESTUDO DE CASO: GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO DO CONJUNTO RESIDENCIAL DA USP – PROJETO PUREFA.....</b>	<b>91</b>
6.1	OBJETIVOS DO PROJETO.....	91
6.2	SISTEMA DE TRATAMENTO DO ESGOTO DO CRUSP .....	91
6.3	METODOLOGIA ADOTADA PARA EXECUÇÃO DO PROJETO .....	95
6.3.1	<i>Primeiras Análises Físico-Químicas do Biogás</i> .....	95
6.3.2	<i>Análise do Esgoto do CRUSP</i> .....	98
6.3.3	<i>Dificuldades do Projeto</i> .....	101
6.3.4	<i>Instalação da Tubulação</i> .....	103
6.3.5	<i>Sistema de Purificação do Biogás</i> .....	104
6.3.5.1	<i>Análises Físico-Químicas do Biogás Antes e Após o Sistema de Purificação</i> ....	105
6.3.6	<i>Pré-Instalação do Medidor de Vazão de Biogás</i> .....	106
6.3.7	<i>Monitoramento do Esgoto</i> .....	108
6.3.8	<i>Alterações no Projeto</i> .....	111
6.3.9	<i>Construção do Abrigo para os Equipamentos</i> .....	112
6.3.10	<i>Monitoramento da Pressão</i> .....	113

6.3.11	<i>Gasômetro: Armazenador de Biogás</i>	114
6.3.12	<i>Grupo Motor-Gerador</i>	114
6.3.13	<i>Instalação Final dos Equipamentos</i>	115
6.3.14	<i>Análise dos Gases de Exaustão do Grupo Motor-Gerador</i>	117
6.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS GRUPOS GERADORES DOS PROJETOS ENERBIOG E PUREFA	118
6.5	ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA	119
6.6	CÁLCULO DOS CRÉDITOS DE CARBONO	127
6.7	ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS PARA MAIOR EFICIÊNCIA DO PROCESSO	129
<b>7.</b>	<b>UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>130</b>
7.1	VANTAGENS, DESVANTAGENS E BARREIRAS EXISTENTES	130
7.2	POLÍTICAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE ENERGIA DESCENTRALIZADA	134
7.2.1	<i>Diretrizes Políticas</i>	134
7.2.2	<i>Diretrizes Legislativas, Administrativas e Institucionais</i>	135
7.2.3	<i>Diretrizes Tecnológicas</i>	136
7.2.4	<i>Diretrizes Financeiras e Fiscais</i>	137
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>138</b>
8.1	TRABALHOS FUTUROS	140
8.1.1	<i>Metodologia a ser Adotada</i>	140
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>142</b>
	ANEXO A - FLUXO DE CAIXA DO PROJETO ENERBIOG	152

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da biomassa como fonte renovável e sustentável de energia, quer como resíduos sólidos urbanos, efluentes industriais ou comerciais e resíduos rurais, permite diversificar a matriz energética nacional, além de reduzir a emissão de gases efeito estufa.

A geração de resíduos sólidos e efluentes domésticos está diretamente relacionada com a população urbana, seu padrão de vida e hábitos de consumo. A coleta, tratamento e disposição adequada destes resíduos se refletem na qualidade de vida da população e das águas dos rios e águas subterrâneas, na atividade pesqueira e nos vetores patogênicos.

O aterro sanitário é uma das formas de disposição de resíduos sólidos urbanos econômica e ambientalmente segura.

Os mesmos problemas encontrados no manejo dos resíduos sólidos são verificados no manejo dos resíduos líquidos, que são coletados nas áreas urbanas e, na maioria dos casos, não recebem nenhum tipo de tratamento antes de serem despejados nos cursos de água.

Com a crise do petróleo na década de 70 foi trazida para o Brasil a tecnologia da digestão anaeróbia. Na região nordeste foram implantados vários programas de difusão dos biodigestores e a expectativa era grande, porém os benefícios obtidos a partir do biogás e do biofertilizante não foram suficientes para dar continuidade aos programas e os resultados não foram muito satisfatórios (BOLETIM ENFOQUE, 1999).

O grande volume de resíduos, a partir dos quais é possível obter biogás, provenientes das explorações agrícolas e pecuárias, assim como aqueles produzidos por matadouros, destilarias, fábricas de laticínios, esgotos domésticos e estações de tratamento de lixo urbanos apresentam uma carga poluente elevada que impõem a criação de soluções que permitam diminuir os danos provocados por essa poluição, gastando o mínimo de energia possível em todo o processo (CENBIO, 2000a).

Assim, o tratamento desses efluentes pode processar-se por intermédio da fermentação anaeróbica que, além da capacidade de despoluir, permite valorizar um produto energético, o biogás, e ainda obter um fertilizante, cuja disponibilidade contribui para uma rápida amortização dos custos da tecnologia instalada.

Existem duas situações possíveis para o aproveitamento do biogás. A primeira consiste na queima direta (aquecedores, esquentadores, fogões, caldeiras). A segunda diz respeito à

conversão de biogás em eletricidade. Isto significa que o biogás permite a produção de energia elétrica e térmica.

Um dos sistemas de obtenção do biogás mais conhecidos é o biodigestor para aplicação rural, existindo grande número de unidades instaladas, principalmente nos países originários dos modelos mais difundidos, Índia (com aproximadamente 300 mil) e a China (com mais de 8 milhões). Recentemente vários outros países do continente europeu têm realizado programas de disseminação e uso de biodigestores (BOLETIM ENFOQUE, 1999)

Um sistema de geração de energia a partir do biogás possui 3 componentes básicos: a captação do gás, o processamento e conversão do gás, que promove a limpeza (remoção de partículas em suspensão e outros contaminantes) do gás e o converte em eletricidade e o equipamento de interconexão que entrega a eletricidade, a partir da geração, ao usuário final. (COSTA et al., 2001).

Mesmo se tratando de plantas maiores de tratamento anaeróbico de efluentes, esse sistema de geração é utilizado, pois o biogás necessita ser coletado e tratado, por medida de segurança e de combate à poluição, devido as emissões de gases efeito estufa.

Uma alternativa para a diminuição dos impactos ambientais provocados pela emissão destes gases, empregada com maior frequência, consiste em queimá-los em *flare*, convertendo o metano em dióxido de carbono, que mesmo sendo prejudicial, quantitativamente é cerca de vinte e uma vezes menos nocivo ao meio ambiente, quando comparado ao metano (CENBIO, 2000a).

Objetivando verificar o desempenho de biodigestores modelo Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente (RAFA) ou *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), o Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) comprometeu-se com a execução de duas metas referentes ao projeto Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas (PUREFA), que visa a redução do consumo de energia da Universidade de São Paulo, utilizando fontes renováveis de energia. Estas metas envolvem a captação, purificação e armazenamento do biogás gerado num biodigestor localizado no Centro Técnico Hidráulico (CTH), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e sua utilização para geração de energia elétrica. Tal projeto foi financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) em edital voltado à infra-estrutura (CT-INFRA).

Esta dissertação visa avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento do esgoto do Conjunto Residencial da USP (CRUSP), abordando os aspectos técnicos, ambientais e econômicos do projeto.

## 2. ESTADO DA ARTE DO BIOGÁS

### 2.1 Histórico do Biogás

A data de descoberta do biogás, ou "gás dos pântanos" é do ano de 1667 (CLASSEN; LIER; STAMRS, 1999) e só um século mais tarde que se volta a reconhecer a presença de metano no gás dos pântanos, atribuído a Alessandro Volta, em 1776. Já no século XIX, Ulysse Grayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbia<sup>1</sup> de uma mistura de estrume e água, a 35 °C, conseguindo obter 100 litros de gás por m<sup>3</sup> de matéria (NOGUEIRA, 1986). Em 1884, Louis Pasteur, ao apresentar os trabalhos do seu aluno à Academia das Ciências, considerou que esta fermentação podia constituir uma fonte de aquecimento e iluminação.

Os primeiros países a utilizarem o processo de biodigestão, de forma mais intensa e com finalidade energética foram a Índia e a China (décadas de 50 e 60), sendo que esses países e outros, geralmente do terceiro mundo, desenvolveram seus próprios modelos de biodigestores (NOGUEIRA, 1986).

Com a crise do petróleo na década de 70 foi trazida para o Brasil a tecnologia da digestão anaeróbia. Na região nordeste foram implantados vários programas de difusão dos biodigestores e a expectativa era grande, porém os benefícios obtidos a partir do biogás e do biofertilizante, não foram suficientes para dar continuidade aos programas e os resultados não foram muito satisfatórios (BOLETIM ENFOQUE, 1999).

Atualmente, esse processo vem se difundindo por vários países. A recuperação de energia gerada pelos processos de tratamento anaeróbio teve grande impulso com a crise do petróleo, quando diversos países buscaram alternativas para a sua substituição. Entretanto, como descreve Nogueira (1986), as soluções para os problemas de desenvolvimento devem ser apropriadas às necessidades, às capacidades e recursos humanos, aos recursos financeiros e à cultura. Assim, o impulso recebido no período de crise não chegou a constituir um sólido movimento de substituição dos recursos não renováveis por outras fontes renováveis.

Até pouco tempo, o biogás era simplesmente conhecido como um sub-produto obtido a partir da decomposição anaeróbia de lixo urbano, resíduos animais e de estações de tratamento de efluentes domésticos. No entanto, o acelerado desenvolvimento econômico dos últimos anos e a

---

<sup>1</sup> Decomposição Anaeróbia: decomposição sem presença de oxigênio.

alta acentuada do preço dos combustíveis convencionais têm encorajado as investigações na produção de energia a partir de novas fontes renováveis e economicamente atrativas, tentando sempre que possível, criar novas formas de produção energética que possibilitem a poupança dos recursos naturais esgotáveis.

O primeiro documento relatando a coleta de biogás de um processo de digestão anaeróbia ocorreu em uma estação de tratamento de efluentes municipal da Inglaterra, em 1895, sendo que o primeiro estudo de aproveitamento em uma pequena planta, com uso de estrume e outros materiais, remontam de 1941, na Índia. Desde então, o processo anaeróbio tem evoluído e se expandido ao tratamento de resíduos industriais, agrícolas e municipais (ROSS; DRAKE, 1996).

Villen et al. (2001) discorre sobre digestão anaeróbia, salientando que na natureza existem vários ambientes favoráveis ao desenvolvimento desse processo, sendo representados pelos pântanos, estuários, mares e lagos, usinas de carvão e jazidas petrolíferas.

Esses sistemas anaeróbios possuem concentrações baixas de oxigênio, facilitando a ocorrência da geração do biogás. Da observação casual da combustão natural desse gás na superfície de regiões pantanosas, o ser humano tomou ciência da possibilidade de produzir gás combustível, partindo de resíduos orgânicos.

Posteriormente, passou-se a desenvolver e utilizar esse processo fermentativo para o tratamento de esgoto doméstico, objetivando, principalmente, a destruição da matéria orgânica. Isso ocorreu na metade do século XIX e o gás produzido era destinado à iluminação.

No começo do século XX, ocorreu na Índia e na China, o início do desenvolvimento de biodigestores para a produção de gás metano a partir de esterco de animais, principalmente bovinos.

Somente a partir de 1960, a digestão anaeróbia passou a ser pesquisada com caráter mais científico, havendo então, grandes progressos quanto à compreensão dos fundamentos do processo e também de projetos de biodigestores e equipamentos auxiliares.

Segundo Chambers e Potter (2002), a aplicação da digestão anaeróbia na América do Norte encontra-se, predominantemente, na estabilização do lodo do esgoto urbano e no tratamento anaeróbio de efluentes industriais e agropecuários.

## **2.2 Formação do Biogás**

O biogás é uma mistura gasosa combustível, produzida através da digestão anaeróbia, processo fermentativo que tem como finalidade a remoção de matéria orgânica, a formação de biogás e a produção de biofertilizantes ricos em nutrientes.

A produção de biogás também é possível a partir de diversos resíduos orgânicos, como esterco de animais, lodo de esgoto, lixo doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas. Nesse caso, quando a digestão anaeróbia é realizada em biodigestores especialmente planejados, a mistura gasosa produzida pode ser usada como combustível, o qual, além de seu alto poder calorífico, de não produzir gases tóxicos durante a queima e de ser uma ótima alternativa para o aproveitamento do lixo orgânico, ainda deixa como resíduo um lodo que é um excelente biofertilizante.

A composição típica do biogás é cerca de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio (WEREKO-BROBBY; HAGEN, 2000). Dependendo da eficiência do processo, influenciado por fatores como pressão e temperatura durante a fermentação, o biogás pode conter entre 40% e 80% de metano.

### **2.2.1 Aspectos Microbiológicos**

No tratamento anaeróbio de efluentes, após a diminuição da quantidade de oxigênio, começam a predominar microrganismos anaeróbios facultativos, ou seja, aqueles que preferencialmente não usam oxigênio na decomposição da matéria orgânica, podendo, porém, utilizá-lo. Segundo Foresti, 1999, estas bactérias, primeiramente, convertem o material orgânico particulado em compostos dissolvidos, num processo, denominado hidrólise ou liquefação (primeira fase). Os polímeros orgânicos (glucídios, lipídeos, protídeos,...) de tamanho consideravelmente grande para penetrarem no interior das células bacterianas, podem somente ser degradados sob a ação de enzimas hidrolíticas extracelulares (celulases, hemicelulases, ...).

Os oligômeros e os monômeros assim formados, de tamanho suficientemente pequeno para penetrar no interior das células, são então metabolizados. A passagem da membrana

citoplasmática<sup>2</sup> se faz por duas vias: difusão passiva segundo o gradiente de concentração ou por transporte ativo das proteínas membranáceas<sup>3</sup>. No interior das células, estes substratos são metabolizados em função do equipamento enzimático da célula, em ácidos orgânicos, cetonas, álcoois, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. É a fase de acidificação (segunda fase). De um ponto de vista bioquímico, percebe-se que a hidrólise e a fase ácida constituem duas etapas distintas.

Por outro lado, microbiologicamente, verifica-se que as bactérias não podem sobreviver somente da fase de hidrólise, visto que tudo acontece no exterior da célula. São, portanto, as mesmas bactérias que realizam as duas fases, agrupadas por esta razão em uma só fase. Estas bactérias são anaeróbias estritas ou facultativas, porém na sua maioria são anaeróbias estritas. Esta segunda fase se caracteriza, portanto, por ser um processo bioquímico pelo qual as bactérias obtêm energia pela transformação da matéria orgânica hidrolisada.

Durante esta fase são produzidas quantidades consideráveis de compostos orgânicos simples e de alta solubilidade, principalmente ácidos graxos voláteis. Os metabólitos<sup>4</sup> finais das bactérias hidrolíticas acidogênicas<sup>5</sup> são excretas das células e entram em solução no meio. Eles passam, então, a ser substratos das bactérias acetogênicas<sup>6</sup>. As bactérias acetogênicas produzem o hidrogênio como metabólito obrigatório (em inglês, denominados OHPA – Obligate Hydrogen Producing Acetogenic). A existência destas bactérias foi mostrada por CUNHA, em 1967.

Na terceira fase (acetogênese), As bactérias acetogênicas desempenham um importante papel entre a acidogênese e a metanogênese. Bactérias acetogênicas, produtoras de hidrogênio são capazes de converter ácidos graxos com mais de 2 carbonos a ácidos acéticos, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> que são os substratos para as bactérias metanogênicas. Nesta fase, o efluente possui alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), valor usado para indicar a concentração de matéria orgânica em

---

<sup>2</sup> A membrana citoplasmática é responsável pela integridade da célula, bem como pela regulação da passagem de moléculas para o interior e/ou para o exterior. A membrana envolve todo o compartimento celular e nela são encontradas proteínas e outras moléculas (colesterol, por exemplo, em células animais). O citoplasma das células está frequentemente em movimento, arrastando de modo ordenado os organitos e os materiais em suspensão. Estes movimentos, conhecidos como correntes citoplasmáticas, devem favorecer as trocas entre os diversos componentes celulares mas não é certo que seja essa a sua função principal. Fonte: <http://curlygirl3.no.sapo.pt/index.htm>

<sup>3</sup> Proteínas membranáceas: proteínas das membranas celulares.

<sup>4</sup> Metabólicos: produtos do metabolismo.

<sup>5</sup> Bactérias acidogênicas: bactérias responsáveis pela formação de ácidos graxos voláteis durante a decomposição anaeróbia da matéria orgânica.

<sup>6</sup> Bactérias acetogênicas: bactérias responsáveis pela formação de acetatos, como ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH), durante a decomposição da matéria orgânica.

um dado volume líquido. Os valores de DBO são superiores a 10 g/l. Um outro indicador da quantidade de compostos orgânicos em um líquido é a Demanda Química de Oxigênio (DQO).

Na quarta e última fase, os compostos orgânicos simples formados na fase acetogênica, são consumidos por bactérias estritamente anaeróbias, denominadas bactérias metanogênicas, que dão origem ao metano ( $\text{CH}_4$ ) e ao gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). Estas bactérias metanogênicas desenvolvem-se preferencialmente em valores de pH próximos do neutro (pH = 7,0), entre 6,8 e 7,3. O fluxograma geral do processo de decomposição anaeróbio é mostrado na Figura 1.

Uma vez estabelecido este equilíbrio no pH, qualquer acúmulo de ácidos pode provocar uma queda na quantidade de bactérias metanogênicas, prejudicando o processo de decomposição dessa fase. Estando o pH próximo do neutro, reduz-se a solubilização de compostos inorgânicos (IPT/CEMPRE, 2000). Enquanto o consumo dos ácidos voláteis simples faz o pH subir, a DBO, por sua vez, começa a baixar.

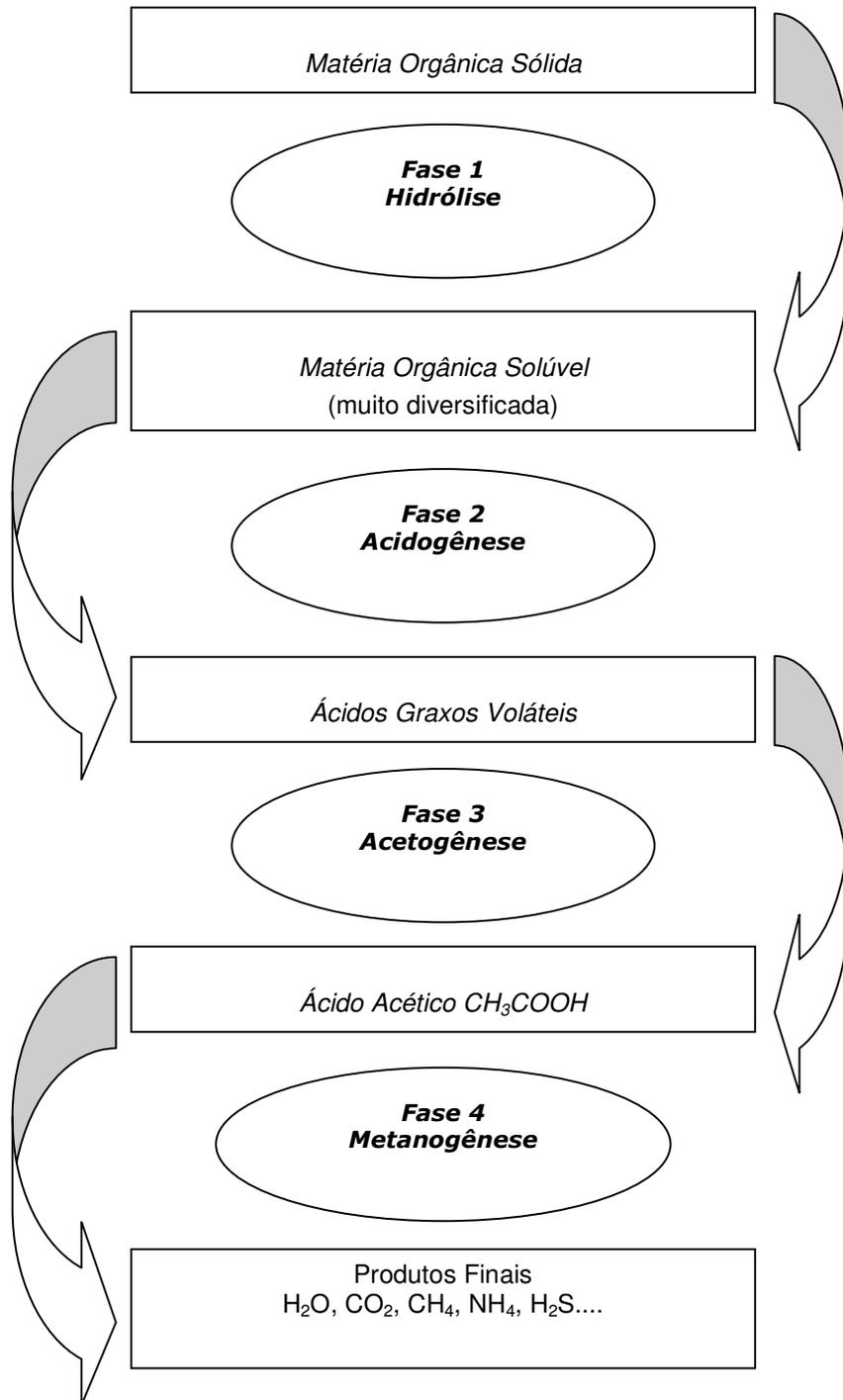


Figura 1. Fluxograma do processo de decomposição anaeróbia.  
Fonte: JUNIOR, 2000.

### 2.2.1.1 Fatores que Influenciam a Geração de Biogás

Os produtos intermediários da degradação anaeróbia são os ácidos graxos voláteis (AGVs) e seus principais efeitos são o impacto sobre o pH quando existe acúmulo dos ácidos graxos voláteis, geração de poluição global da fase aquosa pelas matérias orgânicas e ação complexante de certos metabólitos. Quanto aos metabólitos finais da degradação anaeróbia, pode-se verificar os principais na Tabela 1.

Tabela 1. Produtos finais do processo de degradação anaeróbia.

Elementos Constituintes da Matéria Orgânica	Produtos Finais da Biodegradação Anaeróbia
H	H <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub>
C	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
N	NH <sub>4</sub>
O	CO <sub>2</sub>
S	S <sup>2-</sup> , H <sub>2</sub> S
Metais	Seus sulfetos

Fonte: JUNIOR, 2000.

Os principais efeitos são: a influência do CO<sub>2</sub>, dos bicarbonatos e carbonatos sobre o pH do meio aquoso e sua capacidade ácido-básica, a possível insolubilização dos metais sob a forma de sulfetos muito pouco solúveis, a complexação<sup>7</sup> do cobre pelos íons NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e a emissão eventual de maus odores.

Resumem-se abaixo os principais parâmetros da digestão anaeróbia relacionados à geração de biogás:

#### a) Impermeabilidade ao ar

As bactérias metanogênicas são essencialmente anaeróbias. A decomposição de matéria orgânica na presença de ar (oxigênio) irá produzir apenas dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

<sup>7</sup> Complexação: atração eletrostática entre um íon e um agente quelante, como a água por exemplo, de modo que não há transferência de elétrons entre estes. Fonte: <http://www.ufpa.br/quimicanalitica/tritocomplexacao.htm>

b) Natureza do substrato

Os substratos nutritivos devem prover as fontes de alimento aos microrganismos (elementos químicos constituindo o material celular e os necessários às atividades enzimáticas), particularmente os oligo-elementos<sup>8</sup>, como o cálcio, magnésio, potássio, sódio, zinco, ferro, cobalto, cobre, molibdênio e manganês. Em fortes concentrações, estes elementos têm um efeito inibidor sobre o processo de fermentação. Por outro lado, os elementos majoritários (carbono, nitrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre) têm uma importância fundamental no rendimento dos gases de fermentação. A Tabela 2 mostra as concentrações de inibição do processo de fermentação.

Tabela 2. Concentrações e fator de inibição do processo de fermentação.

Íons	Concentração (mg/L)		
	Estimulante	Inibidora	
		Fraco	Forte
Sódio Na+	100 a 200	3.500 a 5.500	8.000
Potássio K+	200 a 400	2.500 a 4.500	12.000
Cálcio Ca+	100 a 200	2.500 a 4.500	8.000
Magnésio Mg <sup>++</sup>	75 a 150	1.000 a 1.500	3.000
Nitrogênio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	5 a 200	1.500 a 3.000	3.000
Sulfetos S <sup>-</sup>	-	menos de 200	200
Ni <sup>++</sup> , Cr <sup>6+</sup> , Zn <sup>++</sup> , Pb <sup>++</sup>	-	-	100

Fonte: JUNIOR, 2000.

c) Composição dos resíduos

Quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de metano e vazão de biogás. Os principais nutrientes (substrato) dos microrganismos são carbono, nitrogênio e sais orgânicos. Uma relação específica de carbono para nitrogênio deve ser mantida entre 20:1 e 30:1. A principal fonte de nitrogênio está nas dejeções humanas e de

---

<sup>8</sup> Oligo-elementos: elementos minerais que em fracas doses são indispensáveis às reações enzimáticas.

animais, enquanto os polímeros presentes nos restos de culturas representam o principal fornecedor de carbono. A produção de biogás não é bem sucedida, se apenas uma fonte de material for utilizada.

d) Teor de água

O teor de água dentro do biodigestor deve variar de 60 a 90% do peso do conteúdo total.

e) Temperatura

A atividade enzimática das bactérias depende estritamente da temperatura, visto que é conhecido que alterações bruscas de temperatura causam desequilíbrio nas culturas envolvidas, principalmente nas bactérias formadoras de metano. Em torno de 10 °C esta atividade é muito reduzida e acima de 65 °C as enzimas são destruídas pelo calor. Portanto, a faixa ideal para a produção de biogás é de 32°C a 37°C (bactérias mesofílicas) e de 50°C a 60°C (bactérias termofílicas).

f) pH

A concentração em íons OH<sup>-</sup> no meio exterior tem uma grande influência sobre o crescimento dos microrganismos. Na digestão anaeróbia, observam-se duas fases sucessivas: a primeira se caracteriza por uma diminuição do pH em patamares próximos de 5,0 e a segunda por um aumento do pH e sua estabilização em valores próximos da neutralidade. A redução do pH é devida à ação das bactérias acidogênicas, as quais liberam rapidamente ácidos graxos voláteis. As bactérias metanogênicas (que têm taxas de crescimento mais fracas que as primeiras) se instalam progressivamente e induzem a elevação do pH através da catálise do ácido acético. No caso de tratamento anaeróbio em biodigestores (processos contínuos), o pH permanece neutro (pH ~ 7).

### **2.2.2 Aspectos Físico-Químicos**

Pode-se assumir que, sendo o biogás, basicamente metano e gás carbônico, as discussões se restringem às propriedades físico-químicas dos dois, uma vez que os outros gases apresentam-se em quantidades muito pequenas, além de dependerem da composição do material digerido. Apesar disso, esses gases presentes em menores quantidades influenciam na escolha da

tecnologia de operação, limpeza e combustão. A Tabela 3 mostra algumas das propriedades físicas do metano, gás carbônico e gás sulfídrico.

Tabela 3: Propriedades físicas do metano, gás carbônico e gás sulfídrico.

Propriedade	Metano (CH <sub>4</sub> )	Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	Gás sulfídrico (H <sub>2</sub> S)
Peso Molecular	16.04	44.01	34.08
Peso Específico Ar=1	0,555 <sup>a</sup>	1,52 <sup>a</sup>	1,189 <sup>b</sup>
Volume Específico	1473,3 cm <sup>3</sup> /g <sup>a</sup>	543,1 cm <sup>3</sup> /g <sup>b</sup>	699,2 cm <sup>3</sup> /g <sup>b</sup>
Capacidade Calorífica, Cp, a 1 atmosfera	0,775 kcal/kg°C <sup>a</sup>	0,298 kcal/kg°C <sup>c</sup>	0,372 kcal/kg°C <sup>b</sup>
Relação, CP/CV	1,307	1,303	1,320
Poder Calorífico	13,268 kcal/kg	0 kcal/kg	4,633 kcal/kg
Limite de Inflamabilidade	5-15% por volume	Nenhum	4-46% por volume

Obs: a - 60 °C, 1 atm ; b - 70°C, 1 atm ; c - 77°C, 1 atm

Fonte: ROSS et al, 1996.

O principal componente do biogás, quando se pensa em utilizá-lo como combustível, é o metano. Segundo Alves (2000), a presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente uma vez que, presentes na combustão absorvem parte da energia gerada. A medida em que se eleva a concentração de impurezas, o poder calorífico do biogás torna-se menor. A Figura 2 mostra a relação entre o poder calorífico do biogás e a porcentagem em volume de metano presente nele.

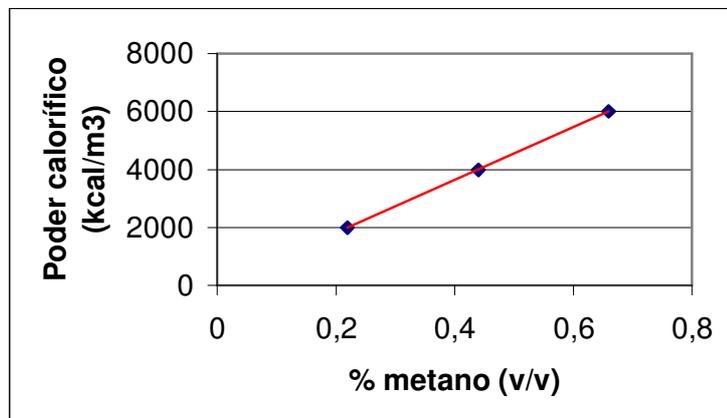


Figura 2. Relação entre o poder calorífico do biogás e porcentagem em volume de metano.

Fonte: Alves, 2000.

Assim como os gases puros, as características do biogás dependem da temperatura e da pressão, variando com elas e com o teor de umidade. O fundamental, quando se trata de gases para fins de geração de energia é conhecer seu volume, seu poder calorífico e a própria umidade. O poder calorífico do biogás bruto é de cerca de  $6\text{kWh/m}^3$  - aproximadamente meio litro de óleo diesel, e o do gás purificado  $9,5\text{kWh/m}^3$ . O poder calorífico líquido, entretanto, depende da eficiência dos equipamentos empregados no uso energético do gás (COELHO et al, 2001).

Outro aspecto importante a ser considerado é a umidade presente no biogás, uma vez que tem influência direta no processo de combustão, afetando a temperatura de chama, limites de inflamabilidade, diminuição do poder calorífico e taxa ar-combustível do biogás.

Além da umidade, o volume de biogás, representado pelo peso específico (relação entre a sua densidade e a densidade do ar) é outro parâmetro importante quando se deseja manipular o gás para armazenamento. A Figura 3 mostra o peso específico do biogás numa faixa de concentração de 40 a 100% de metano que o constitui.

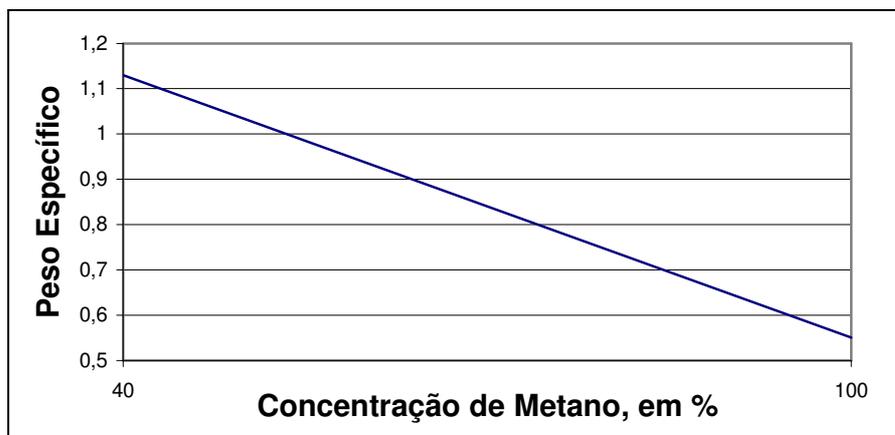


Figura 3. Peso específico do biogás (Faixa de concentração-40 A 100% de CH<sub>4</sub>).  
Fonte: ROSS et al, 1996.

Um estudo feito por da SILVA (1983) mostrou que de acordo com a quantidade de metano no biogás o seu poder calorífico aumenta, pois o CO<sub>2</sub>, o outro produto da digestão anaeróbia, é a forma mais oxidada do carbono, não podendo ser mais queimado. A Tabela 4 mostra que 1 m<sup>3</sup> de biogás (cujo poder calorífico é em média 5.500 kcal) equivale a:

Tabela 4. Equivalência energética de 1 Nm<sup>3</sup> de biogás

Combustível	Quantidade equivalente a 1 Nm <sup>3</sup> de biogás
Carvão Vegetal	0,8 kg
Lenha	1,5 kg
Óleo Diesel	0,55 L
Querosene	0,58 L
Gasolina Amarela	0,61 L
GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	0,45 L
kWh	1,43
Álcool Carburante	0,80 L
Carvão Mineral	0,74 kg

Fonte: CARDOSO FILHO, 2001.

O gás metano queima com uma chama luminosa; quando puro, para o biogás a chama não é tão luminosa. O biogás não é tóxico, mas atua sobre o organismo humano, diluindo o oxigênio e, como consequência, pode provocar a morte por asfixia. Muito estável, não é solúvel em água. A combustão do metano não libera resíduos. Sob uma pressão de 140 atm, o metano se liquefaz a 0 °C, enquanto que outros hidrocarbonetos mais pesados (como os gases componentes do GLP – propano, isobutano e butano) se liquefazem a baixas pressões (o propano se liquefaz a 8,7 atm; o isobutano a 3,2 atm e o butano a 2,2 atm). De acordo com da SILVA (1983), o biogás é mais denso que o ar (a densidade do biogás em relação ao ar é de 0,55).

### **3. Aspectos Técnicos**

#### **3.1 Tecnologias Aplicadas à Produção de Biogás**

O aumento desordenado da população e o desenvolvimento de grandes núcleos urbanos sem planejamento, sobretudo nos países em desenvolvimento, dificultam as ações de manejo de resíduos. A necessidade de disposição e tratamento é reconhecida, mas, por falta de recursos, essas ações costumam ser postergadas, provocando problemas de saúde nas populações e degradação do meio ambiente.

No Brasil, uma grande variedade de sistemas é utilizada para o tratamento de efluente líquido. Apesar disso, uma grande parcela dos efluentes gerados é lançada diretamente nos corpos d'água sem tratamento.

Segundo os dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB de 2000 do IBGE, dos 9.848 distritos do país, apenas 2.079 possuíam algum tipo de tratamento coletivo. A Tabela 5, a seguir, apresenta esses dados.

Para o tratamento de efluentes líquidos, a digestão anaeróbia representa importante papel, pois além de permitir a redução significativa do potencial poluidor, permite a recuperação da energia na forma de biogás (FISHER et al., 1979; LUCAS JÚNIOR, 1998).

Os digestores anaeróbios, ou biodigestores, são equipamentos utilizados para digestão de matérias orgânicas. Constituem-se de uma câmara fechada, onde é colocado o material orgânico, em solução aquosa e, por meio da decomposição anaeróbia, há diminuição do volume de sólidos e estabilização do lodo<sup>9</sup> bruto (BRAILE, 1983). Em alguns casos, os biodigestores possuem uma parte inferior cônica para deposição do lodo, enquanto a parte superior permite a captação do biogás (LEMAIRE & LEMAIRES, 1975).

---

<sup>9</sup> Estabilização do lodo: reduzir seu conteúdo em microorganismos patogênicos e inibi-los, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação do lodo e, conseqüentemente, seu potencial de produção de odores. Fonte: [http://portaldeseres.cict.fiocruz.br/transf.php?script=thes\\_chap&id=00007105&lng=pt&nrm=iso](http://portaldeseres.cict.fiocruz.br/transf.php?script=thes_chap&id=00007105&lng=pt&nrm=iso)

Tabela 5. Número de distritos com tratamento de esgoto sanitário por tipo de sistema de tratamento.

Região	Distritos		Distritos com tratamento de esgotos de acordo com o tipo de sistema de tratamento						
	Total	Com Tratamento	Filtro biológico	Lodo ativado	Reator anaeróbico	Valo de oxidação	Lagoas (anaeróbia, aeróbia, aerada, facultativa, mista e de maturação)	Fossa séptica de sistema condominial	Outro
Norte	607	34	2	2	9	-	19	2	-
Nordeste	3084	407	91	21	43	4	184	59	5
Sudeste	3115	1098	173	178	79	13	573	72	10
Sul	2342	430	57	21	147	9	157	35	4
Centro-Oeste	700	110	8	5	19	2	72	3	1
<b>Brasil</b>	<b>9848</b>	<b>2079</b>	<b>331</b>	<b>227</b>	<b>297</b>	<b>28</b>	<b>1005</b>	<b>171</b>	<b>20</b>

Fonte: PNSB, IBGE, 2000.

### 3.1.1 Fluxo de Tratamento

A quantidade total de esgoto a ser tratado em um sistema é função da população e da indústria local a serem atendidas. Ademais, devem ser consideradas as infiltrações de água de chuva e do lençol freático. O volume de esgoto produzido por ano pode ser controlado pelas vazões obtidas nos medidores instalados em pontos determinados do sistema, especialmente na entrada das estações de tratamento.

O processo de tratamento do esgoto pode adotar diferentes tecnologias para depuração do efluente, mas, de modo geral, segue um fluxo que compreende as seguintes etapas (INFORME INFRA-ESTRUTURA, 1997):

- Preliminar – remoção de sólidos grandes e areia para proteger as demais unidades de tratamento, os dispositivos de transporte (bombas e tubulações) e os corpos receptores. A remoção da areia previne, ainda, a ocorrência de abrasão nos equipamentos e tubulações e facilita o transporte dos líquidos. As caixas de areia são feitas com o uso de grades que impedem a

passagem de trapos, papéis, pedaços de madeira, etc.; e os tanques de areia servem para retirada de óleos e graxas em casos de esgoto industrial com alto teor destas substâncias.

- Primário – os esgotos ainda contêm sólidos em suspensão de porte pequeno cuja remoção pode ser feita em unidades de sedimentação, reduzindo a quantidade de matéria orgânica contida no efluente. Os sólidos sedimentáveis e flutuantes são retirados por meio de mecanismos físicos, via decantadores. Os esgotos fluem vagarosamente pelos decantadores, permitindo que os sólidos em suspensão de maior densidade sedimentem gradualmente no fundo, formando o lodo primário bruto. Os materiais flutuantes como graxas e óleos, de menor densidade, são removidos na superfície. A eliminação média da DBO, nesta fase, é de 30%.

- Secundário – ocorre, principalmente, a remoção de sólidos e de matéria orgânica não sedimentável e, eventualmente, nutrientes como nitrogênio e fósforo. Após as fases primária e secundária, a redução da DBO deve alcançar 90%. É a etapa da remoção biológica dos poluentes e sua eficiência permite produzir um efluente em conformidade com o padrão de lançamento previsto na legislação ambiental. Basicamente, são reproduzidos os fenômenos naturais de estabilização da matéria orgânica que ocorrem no corpo receptor, sendo que a diferença está na maior velocidade do processo, na necessidade de utilização de uma área menor e na evolução do tratamento em condições controladas.

- Terciário – remoção de poluentes tóxicos ou não biodegradáveis ou eliminação adicional de poluentes não degradados na fase secundária.

As tecnologias de tratamento de efluentes nada mais são que o aperfeiçoamento do processo de depuração da natureza, buscando reduzir seu tempo de duração e aumentar sua capacidade de absorção, com consumo mínimo de recursos em instalações e operação e o melhor resultado em termos de qualidade do efluente lançado, sem deixar de considerar a dimensão da população a ser atendida.

Quanto à escolha do modelo e do tamanho ideal de biodigestor, é levado em consideração, entre outras variáveis, o tipo da matéria orgânica de entrada, características como a DBO e DQO, as condições locais do solo, capital e custo de manutenção, alta eficiência compatibilizada com custos e operacionalidade, necessidade energética da propriedade e disponibilidade de matéria-prima<sup>10</sup>. A seguir são apresentados alguns tipos de biodigestores mais utilizados.

---

<sup>10</sup> Professor Doutor Elso Vitoratto, informação verbal.

### **3.1.1.1 Biodigestor Modelo Indiano**

Este modelo de biodigestor caracteriza-se por possuir uma campânula como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou em um selo d'água externo, e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. A função da parede divisória faz com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação.

O modelo Indiano possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, aumentando o volume deste, portanto, mantém a pressão em seu interior constante (DEGANUTTI et. al., 2002).

O fato do gasômetro estar disposto ou sobre o substrato ou sobre o selo d'água, reduz as perdas durante o processo de produção de gás.

O resíduo utilizado para alimentar o biodigestor Indiano, deve apresentar uma concentração de ST (sólidos totais) não superior a 8%, para facilitar a circulação do resíduo pelo interior da câmara de fermentação e evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material (DEGANUTTI et. al, 2002). O abastecimento deve ser contínuo, ou seja, geralmente é alimentado por dejetos bovinos e/ou suínos, que apresentam uma certa regularidade no seu fornecimento.

Do ponto de vista construtivo, apresenta-se de fácil construção, contudo o gasômetro de metal pode encarecer o custo final, e também a distância da propriedade onde o resíduo se forma pode dificultar e encarecer o transporte ao biodigestor, inviabilizando a implantação deste modelo de biodigestor.

A Figura 4 mostra a vista frontal, em corte, do biodigestor modelo Indiano. A figura 5 representa o biodigestor tridimensionalmente, em corte, mostrando todo seu interior.

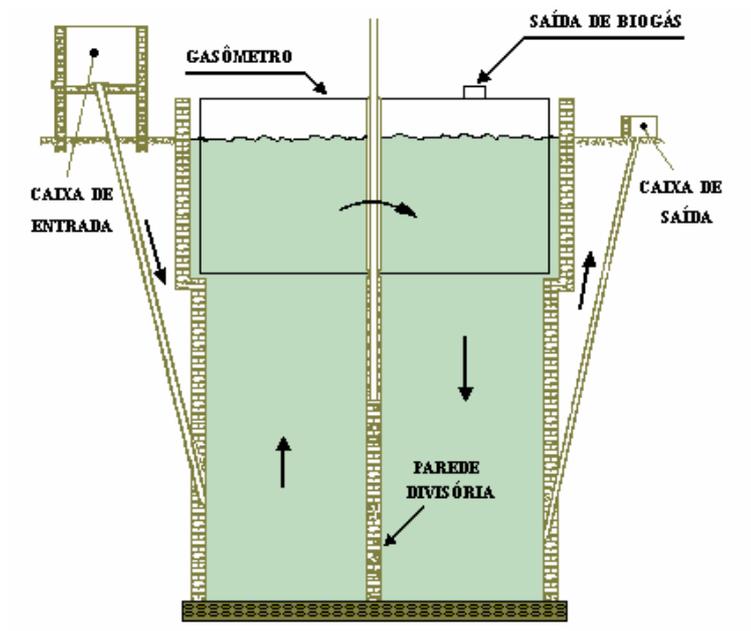


Figura 4. Vista frontal, em corte, do biodigestor modelo Indiano.  
Fonte: BENINCASA et al., 1990.



Figura 5. Vista tridimensional do biodigestor modelo Indiano.  
Fonte: DEGANUTTI et. al, 2002.

### **3.1.1.2 Biodigestor Modelo Chinês**

O biodigestor modelo chinês é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria para fermentação, com teto impermeável, destinado ao armazenamento do biogás. Este biodigestor funciona com base no princípio de prensa hidráulica, de modo que aumentos de pressão em seu interior, devido ao acúmulo de biogás, resultarão em deslocamentos do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre descompressão (BENINCASA et al., 1990).

O modelo Chinês é constituído quase que totalmente em alvenaria, dispensando o uso de gasômetro em chapa de aço, reduzindo os custos, contudo pode ocorrer problemas com vazamento de biogás, caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada.

Neste tipo de biodigestor, uma parcela de gás formado na caixa de saída é libertada para a atmosfera, reduzindo parcialmente a pressão interna do gás. Por este motivo as construções de biodigestores modelo Chinês não são utilizadas para instalações de grande porte (DEGANUTTI et. al, 2002).

Semelhante ao modelo Indiano, o substrato deve ser fornecido continuamente, com a concentração de ST em torno de 8%, para evitar entupimentos do sistema de entrada e facilitar a circulação do material (DEGANUTTI et. al, 2002).

A Figura 6 mostra a vista frontal, em corte, do biodigestor modelo Chinês. Na figura 7, a representação tridimensional mostra todo o interior do biodigestor.

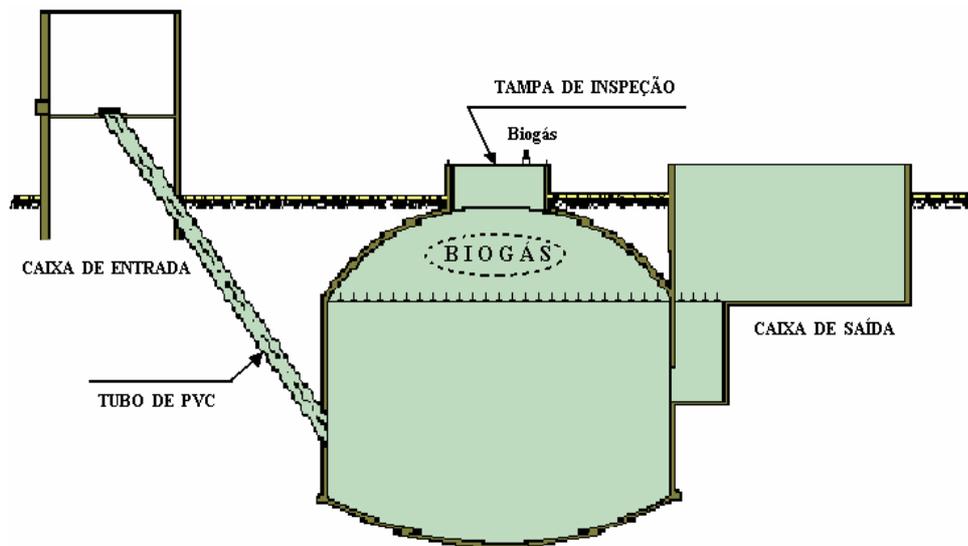


Figura 6. Vista frontal, em corte, do biodigestor modelo Chinês.  
 Fonte: BENINCASA et al., 1990.

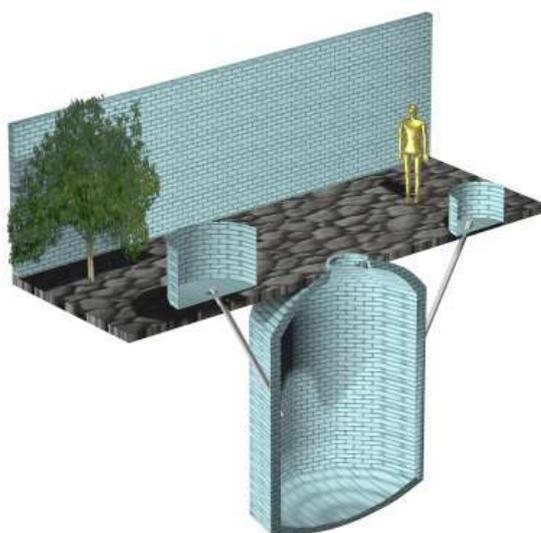


Figura 7. Vista tridimensional do biodigestor modelo Chinês.  
 Fonte: DEGANUTTI et. al, 2002.

Em termos comparativos, os modelos Indiano e Chinês, apresentam desempenho semelhante, apesar do modelo Indiano ter apresentado, em determinados experimentos, maior eficiência quanto a produção de biogás e redução de sólidos no substrato, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6. Resultados preliminares do desempenho de biodigestores modelo Indiano e Chinês, com capacidade de 5,5 m<sup>3</sup> de biomassa, operados com esterco bovino.

	Biodigestor	
	Chinês	Indiano
Redução de Sólidos (%)	37	38
Produção Média de Biogás (m <sup>3</sup> /dia)	2,7	3,0
Produção Média de Substrato (1m <sup>-3</sup> )	489	538

Fonte: JÚNIOR, 1987.

### 3.1.1.3 Biodigestor Modelo RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente)

O biodigestor modelo RAFA (Figura 8), cuja sigla original é UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*) foi desenvolvido por Lettinga. É um biodigestor com retenção interna de lodo, com a incorporação de um separador diferente para os sólidos suspensos e para o gás (LETTINGA et al., 1980).

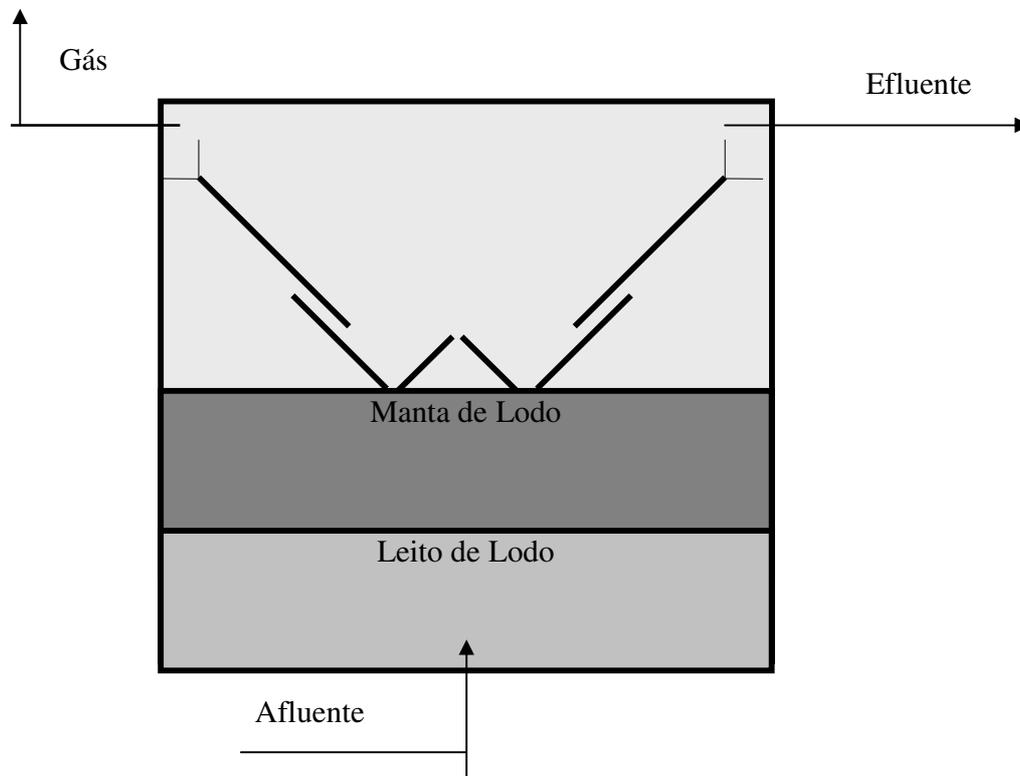


Figura 8. Biodigestor modelo RAFA.  
 Fonte: Adaptação de VITORATTO, 2004.

Esse biodigestor, de certa forma, revolucionou a área de tratamento de efluentes, pois passou a oferecer muitas vantagens que até então não se tinha, como baixo custo operacional, baixo consumo de energia, maior estabilidade do processo, entre outras (HIRATA et al., 1986).

Este tipo de biodigestor vem sendo empregado para o tratamento de esgoto doméstico. Sua eficiência tem sido demonstrada para esgoto bruto, tanto à temperatura controlada (VIEIRA et al., 1987) quanto sem controle de temperatura (BARBOSA, 1988).

O princípio do biodigestor RAFA baseia-se no fluxo ascendente do efluente a ser tratado, o qual é alimentado pelo fundo do reator e atravessa um leito de biomassa ativa, sendo descartado após passar por um sistema de placas defletoras colocadas no topo do biodigestor, separando as fases líquida, sólida e gasosa.

O decantador interno permite que as partículas de lodo retornem à zona de digestão, assegurando o tempo de retenção adequada de sólidos e a obtenção de altas concentrações de lodo anaeróbio no biodigestor.

O biodigestor RAFA, dotado de um sistema apropriado de distribuição da vazão de alimentação, dispensa a recirculação do efluente para fins de fluidificação, pois o contato necessário entre a água residual e o lodo é eficiente, uma vez que o próprio gás gerado no seio da manta de lodo é suficiente para manter o lodo fluidizado e garantir um bom nível de mistura.

O volume deste tipo de biodigestor, em relação a outros, é sensivelmente menor, o que o torna extremamente eficiente, em virtude da retenção do lodo por períodos longos (semanas, meses ou até mesmo anos), enquanto que o tempo de retenção da parte líquida pode ser baixo (horas).

Para o dimensionamento de um biodigestor modelo RAFA, emprega-se os seguintes parâmetros (VITORATTO, 2004):

- Carga Orgânica Aplicada:
  - Para despejos concentrados – valor máximo de 6 a 8 kg DQO/m<sup>3</sup>dia
  - Para despejos com baixa concentração, em torno de 1,5 kg DQO/m<sup>3</sup>dia
- Altura do Biodigestor:
  - Para despejos concentrados – máxima altura de 5 a 6 m
  - Para despejos com baixa concentração – de 3 a 4 m
- A distribuição de fundo do biodigestor deve ser a mais uniforme:
  - Para despejos com alta concentração – 7 a 10 m<sup>2</sup>
  - Para despejos com baixa concentração – 1 a 3 m<sup>2</sup>
- Saída do Líquido:

A saída do líquido ocorre pela parte superior, fluxo ascendente e deve ser a mais uniforme possível. Recomenda-se vertedores reguláveis para o ajuste do fluxo do líquido.

### **3.2 Tecnologias Disponíveis para Conversão em 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 do biogás 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.

O biogás poder ser utilizado, também, na queima direta em caldeiras para cogeração. Pode-se mencionar o surgimento de tecnologias promissoras, porém, não comerciais atualmente, como o da célula combustível, enquanto que as turbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo ciclo Otto, são as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de conversão energética.

### 3.2.1 Turbinas a Gás

Turbinas a gás (Figura 9) para geração estacionária foram desenvolvidas a partir das turbinas usadas em aviação, onde o fluido é o gás da câmara de combustão. São compostas de um compressor de ar, câmara de combustão e turbina. O compressor é acionado pela própria turbina. Na turbina a gás estacionária, o dimensionamento é feito para que os gases de exaustão da turbina saiam em velocidade baixa, aumentando a geração de energia da turbina e, portanto, gerando um excedente de energia para o gerador. Há modelos adaptados para a geração com biogás como os da Solar Turbines e do Grupo Caterpillar (WYLEN, 1995).



Figura 9. Turbina a gás.  
Fonte: SOLAR TURBINES, 2005.

### 3.2.2 Turbinas de Ciclo Brayton

O ciclo Brayton (Figura 10), de turbina a gás, vem se tornando um método cada vez mais utilizado para geração de energia. Neste tipo de máquina, o ar atmosférico é continuamente succionado pelo compressor, onde é comprimido para alta pressão. O ar comprimido entra na câmara de combustão (ou combustor), é misturado ao combustível e ocorre a combustão, resultando em gases com alta temperatura. Os gases provenientes da combustão se expandem

através da turbina e se descarregam na atmosfera. Parte do trabalho desenvolvido na turbina é usado para acionar o compressor, o restante é utilizado para acionar um gerador elétrico ou um dispositivo mecânico. Os dois esquemas de turbinas ciclo Brayton são apresentados na Figura 10. A Figura 11 mostra o diagrama simplificado do Ciclo Brayton.

*Ciclo Brayton aberto e simples*

*Ciclo Brayton com cogeração*

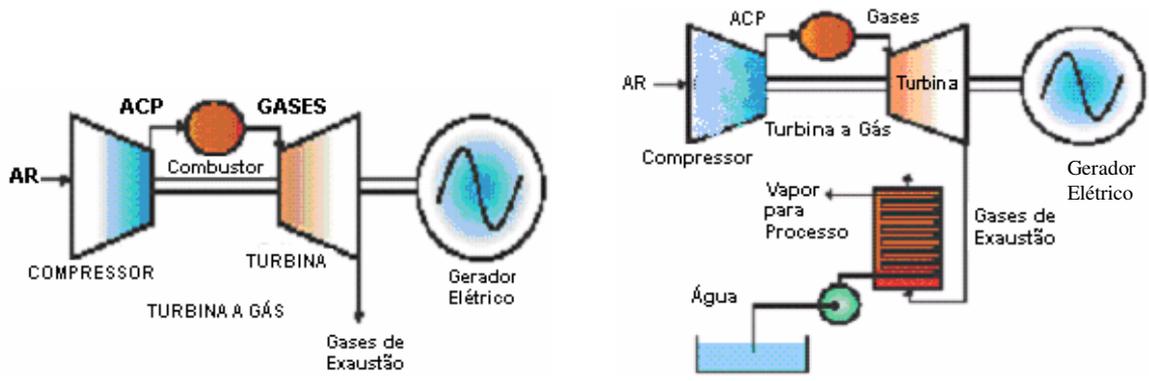


Figura 10. Esquemas de turbinas Ciclo Brayton.  
Fonte: SERVICE ENERGY, 2005.

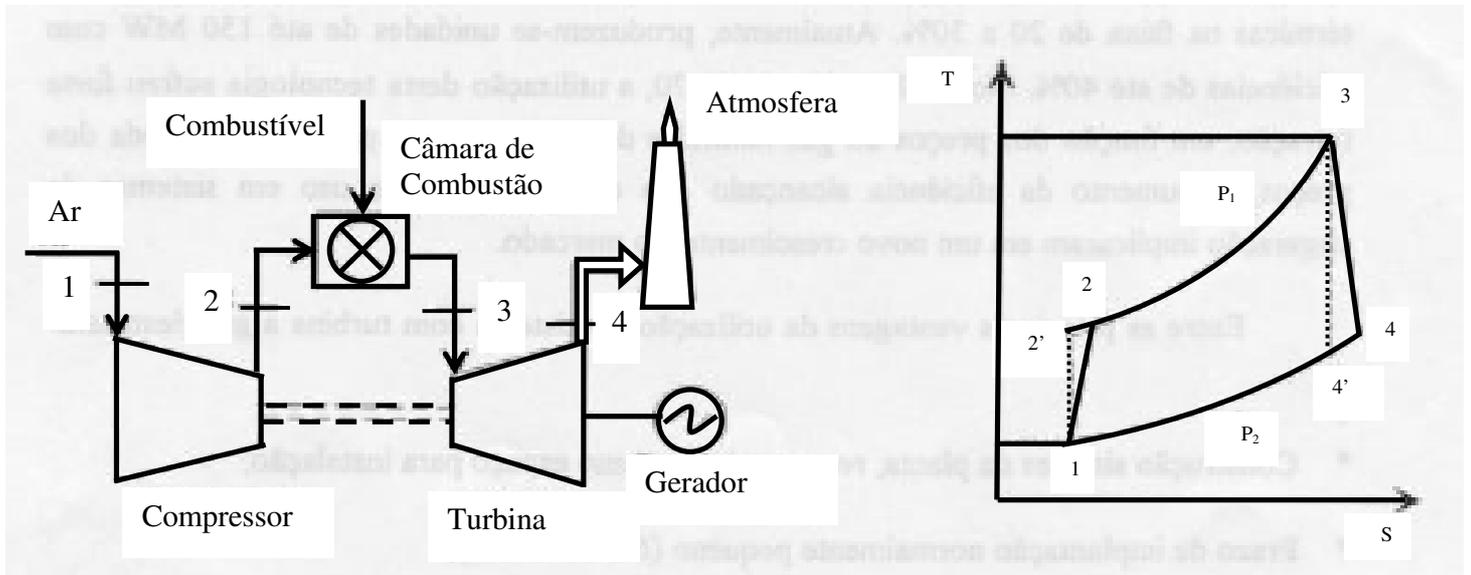


Figura 11. Diagrama simplificado do Ciclo Brayton.  
Fonte: SCHECHTMAN e CECCHI, 1994.

Este tipo de ciclo é chamado de ciclo Brayton simples e aberto, existindo variações que são mostradas adiante. O rendimento térmico do ciclo Brayton é de aproximadamente 35%, mas, atualmente, existem turbinas que atingem um rendimento de 41,9%. A cogeração neste ciclo é obtida através da adição ao ciclo de uma caldeira de recuperação de calor. Neste caso, os gases de exaustão da turbina são direcionados para a caldeira, de modo a gerar vapor. Este vapor é então utilizado no processo industrial.

### **3.2.3 Microturbinas a Gás**

As microturbinas são pequenas turbinas de combustão que operam na faixa de 20 a 250 kW, com elevadas velocidades de rotação e com diversos tipos de combustível, como gás natural, biogás, GLP (gás liquefeito de petróleo), gás de poços de petróleo e plataformas offshore, diesel/gas oil e querosene.

Nas microturbinas o ar é aspirado e forçado para o interior da turbina a alta velocidade e alta pressão. O ar é misturado ao combustível e queimado na câmara de combustão, onde o processo de queima é controlado para se obter a máxima eficiência e baixos níveis de emissão. Os gases produzidos na queima sofrem expansão nas palhetas da turbina, produzindo trabalho. Os gases não aproveitados são exauridos para a atmosfera. A Figura 12 mostra os componentes do sistema de uma microturbina.

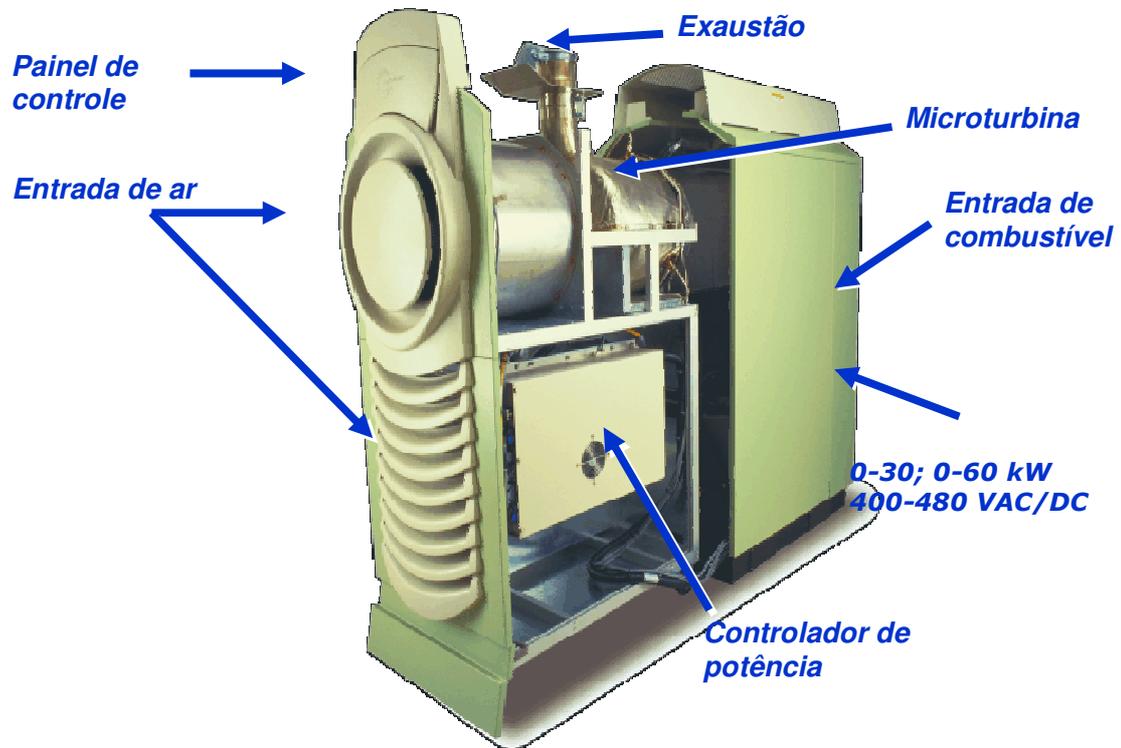


Figura 12. Componentes do sistema da microturbina.  
Fonte: MONTEIRO, 2004.

### 3.2.4 Motores de Combustão Interna

Em 1867, Nikolaus August Otto, um engenheiro alemão, desenvolveu o ciclo Otto de quatro tempos, que é largamente utilizado em transportes até nos dias de hoje.

O motor a diesel surgiu em 1892 com outro engenheiro alemão, Rudolph Diesel. O motor a diesel é projetado para ser mais pesado e mais potente do que os motores a gasolina e utiliza óleo como combustível. Eles são usados em máquinas pesadas, locomotivas, navios e em alguns automóveis. A Figura 13 representa esquematicamente o funcionamento de um motor diesel.

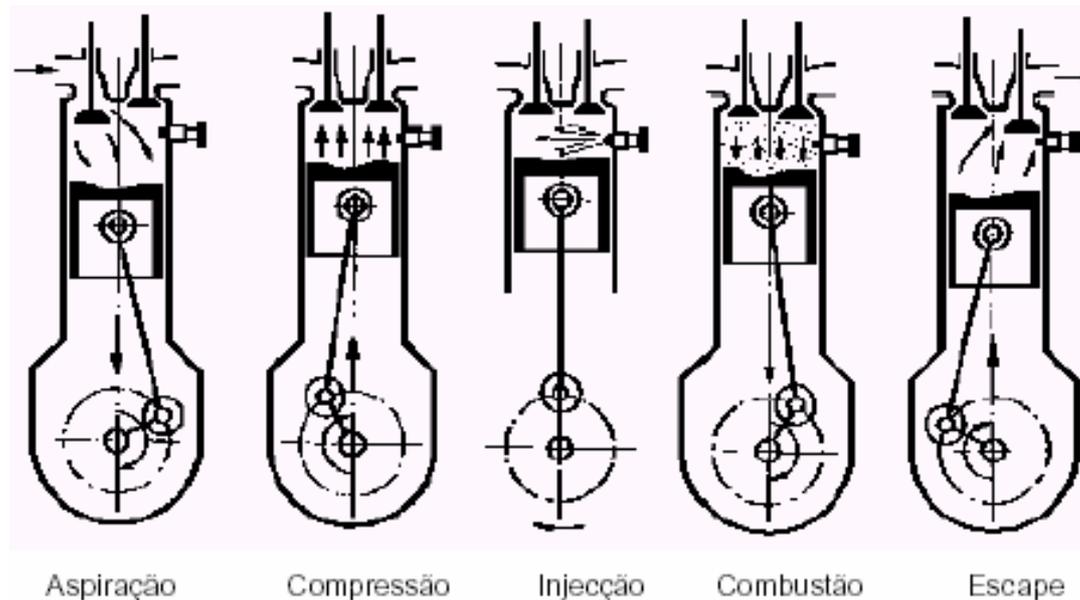


Figura 13. Representação esquemática do funcionamento de um motor diesel.  
 Fonte: DANTE, 2003.

São motores que se aproximam do ciclo de combustão interna da ignição por centelha. Seu rendimento é função apenas da relação de compressão (WYLEN, 1995). Aplicam-se tanto para geração de energia elétrica, pelo acoplamento de um gerador ao motor, quanto à geração de energia mecânica, que pode ser empregada no acionamento de bomba hidráulica, compressor ou veículo.

A diferença básica entre o ciclo Otto e o Diesel está na forma em que ocorre a combustão. No ciclo Diesel, a combustão ocorre pela compressão do combustível na câmara de combustão, enquanto no ciclo Otto, a combustão ocorre pela explosão do combustível através de uma fagulha na câmara de combustão. O ciclo Otto consiste em expansão/resfriamento adiabático, seguido de resfriamento a volume constante, aquecimento/compressão adiabático e aquecimento a volume constante. A válvula de entrada de ar abre no tempo preciso para permitir a entrada de ar (misturado ao combustível) no cilindro. A vela dá ignição na mistura no cilindro, o que cria a explosão. A força da explosão é transferida ao pistão. O pistão desce e sobe em um movimento periódico. A força do pistão é transferida através da manivela para o eixo de transmissão. A Figura 14 mostra o funcionamento de um motor ciclo Otto.

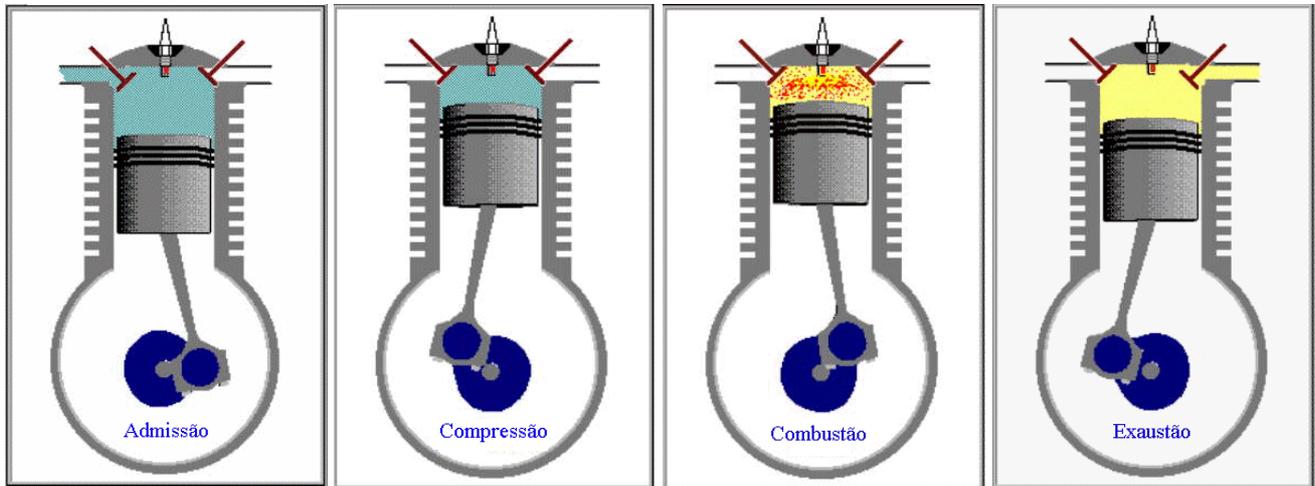


Figura 14. Desenho esquemático do funcionamento de um motor Otto.  
 Fonte: BERTULANI, 2002.

### 3.3 Comparação entre as Tecnologias de Conversão

#### 3.3.1 Tecnologias Disponíveis Comercialmente

##### a) Motores a Gás

- Potência de 30 kW – 20 MW
- Rendimento com biogás em torno de 30 a 34%
- Emissões de NOx:
  - Menores que 3.000 ppm (EPA, 1994)
  - Motores com baixa emissão: menores que 250 ppm

##### b) Motores Diesel: Biogás + Diesel

- Rendimento de conversão elétrica em torno de 30 a 35%
- Necessidade de diesel com baixo teor de enxofre
- Emissão de NOx:
  - Média em torno de 27 ppm

c) Turbinas a Gás para Biogás de Pequeno – Médio Porte

- Potência de 500 kW – 150 MW
- Rendimento em torno de 20 a 30%
- Emissões de NOx:
  - Média em torno de 35 a 50 ppm

d) Microturbinas (CAPSTONES)

- Potência de 30 kW – 100 kW
- Rendimento em torno de 24 a 28%
- Emissões de NOx:
  - Menores que 9 ppm

Para a conversão energética do biogás, os motores possuem maior eficiência. Já as turbinas a gás possuem maior eficiência global de conversão, quando operadas em cogeração (calor e eletricidade).

## **4. ASPECTOS ECONÔMICOS**

### **4.1 Aspectos Econômicos da Produção de Biogás e da sua Utilização na Geração de Energia Elétrica**

Segundo Lima (2005) o consumo de energia em um sistema de tratamento de efluente líquido ocorre na construção e na operação do sistema. Durante a construção, gasta-se energia nas diversas etapas da execução da obra: terraplanagem, concretagem, transporte de material. Na operação do sistema utiliza-se energia nos equipamentos elétricos, para o bombeamento, aeração e no transporte de lodo para recirculação.

O processo anaeróbio pode funcionar sem a necessidade de equipamentos que produzem agitação no biodigestor. Sendo assim, o efluente é forçado a atravessar o lodo, apenas por um sistema de bombeamento.

As tecnologias utilizadas no processo de tratamento de efluentes líquidos devem ser analisadas tomando-se como base determinados parâmetros definidos pelos princípios de sustentabilidade sob o ponto de vista econômico, social e ambiental. Como cada indicador de sustentabilidade depende de uma série de fatores particulares, optou-se por analisá-los separadamente. A relação apresentada a seguir defini os parâmetros selecionados para avaliação e comparação das tecnologias (ENGENHARIA & PROJETOS, 2001):

- Área ocupada pela ETE (Estação de Tratamento de Efluente) – este parâmetro depende da vazão nominal a ser tratada e da tecnologia empregada para o tratamento. Para comparação das tecnologias quanto à área ocupada pela ETE é conveniente analisar a relação entre a área necessária e o número de habitantes atendidos. Desta forma, ao se comparar dois ou mais processos de tratamento, será mais viável aquele que apresentar o menor valor para essa relação ocupada pela ETE;

- Custo de implantação – deve-se considerar que, na maioria das vezes, os recursos financeiros disponíveis são limitados, principalmente em algumas regiões brasileiras. Assim, quanto mais baixo o custo, maior será a oportunidade de implantação. O custo varia de acordo com a tecnologia escolhida, o grau de automação desejado, a vazão tratada e a eficiência desejada

para o tratamento. Para quantificar esse parâmetro deve-se estabelecer a relação entre o custo e o número de habitantes atendidos;

- Potência instalada – a potência instalada de um sistema de tratamento de efluente líquido é função do tipo de tecnologia escolhida, da carga orgânica dos esgotos a serem tratados e da vazão nominal do sistema. Outros fatores como a produção e tipo de tratamento dos lodos gerados pelo sistema são importantes. Para avaliação numérica deste parâmetro deve-se estabelecer a relação entre a potência dos equipamentos mecânicos instalados e o número de habitantes atendidos;

- Consumo de energia – o consumo de energia elétrica é fator de grande importância no custo operacional do sistema. Depende da potência instalada e do período de funcionamento dos equipamentos. A avaliação deste parâmetro deve ser feita pela relação entre o consumo anual de energia elétrica e o número de habitantes atendidos;

- Produção de lodo – constitui-se num dos fatores de maior importância nos custos de operação do sistema. Depende fundamentalmente do tipo de tecnologia empregada, da carga orgânica, grau de eficiência desejado e vazão tratada. Deve ser avaliado pela relação entre a massa de sólidos produzida e o número de habitantes atendidos;

- Remoção de nutrientes – a presença de nutrientes como nitrogênio e fósforo nos esgotos tratados pode constituir-se em fator de grande importância na eutrofização<sup>11</sup> dos corpos d'água receptores. Sua remoção geralmente é feita em unidades de tratamento complementares do processo ou através de estratégias operacionais específicas para essa finalidade e, assim, constitui-se um fator interferente nos custos de implantação e operação do sistema. Deve ser avaliado individualmente para cada parâmetro, classificando-se como alta, remoções superiores a 80%; média, entre 50 e 80% e baixa, para valores inferiores a 50%;

- Simplicidade operacional – é fundamental para o bom funcionamento da ETE que o sistema seja de fácil operação, manutenção e controle. A simplicidade operacional depende da tecnologia empregada no tratamento e dos equipamentos incorporados no sistema. Em geral, quanto maior a automação na operação do sistema, menor o risco. Deve-se ressaltar que o grau de

---

<sup>11</sup> Processo que favorece o crescimento de determinadas espécies vegetais, incluindo algas e infestantes, pelo enriquecimento da água em nutrientes, especialmente azoto e fósforo, resultante da contaminação de origem industrial e agrícola, com efeitos negativos sobre o equilíbrio dos ecossistemas (diminuição dos níveis de oxigênio e do pH das águas; em situações extremas, pode haver perda da fauna, flora e da qualidade da água para consumo humano). Fonte: <http://www.confagri.pt/Ambiente/Glossario/>

automação de ETE está diretamente relacionado aos recursos financeiros disponíveis para a sua construção;

- Vida útil – a vida útil de uma ETE depende da manutenção, da fiscalização do processo construtivo e da variação das condições ambientais interferentes. Este parâmetro é avaliado pelo número de anos em que a estação de tratamento cumpre com a eficiência necessária à vazão de efluente líquido gerado pela população atendida.

Segundo Johansson et al. (1993), os custos operacionais para produção de biogás numa planta UASB, de médio porte, situam-se entre US\$ 0,03 e US\$ 0,05 Nm<sup>3</sup> para plantas de grande porte esses custos podem baixar para cerca de US\$ 0,02/m<sup>3</sup>.

Para a geração de energia elétrica a partir de biogás, o primeiro fator econômico a ser analisado é o da utilização de um gás combustível de baixo custo, uma vez que o biogás é um subproduto de um processo de digestão anaeróbia e que normalmente é desprezado, ora emitido diretamente na atmosfera agravando o impacto ambiental por meio da emissão de gases efeito estufa, ora pela queima em “flares” para minimizar o impacto ambiental.

O biogás pode ser utilizado como combustível tanto em unidades de tratamento anaeróbio de efluentes, como em aterros sanitários, apresentando diferentes perspectivas para cada um desses segmentos. No primeiro caso, este insumo pode contribuir sensivelmente para a diminuição do consumo de eletricidade em ETE's, otimizando o uso dos recursos naturais, dada a estreita relação existente entre a geração de eletricidade e os recursos hídricos nacionais. Vale ressaltar, porém, que o volume de biogás gerado no tratamento anaeróbio não permite a auto-suficiência da operação da ETE (COELHO et. al., 2003b).

No segundo caso, o volume de biogás gerado pode permitir, além da auto-suficiência energética, a geração de excedentes que podem ser comercializados, proporcionando uma receita adicional. Porém, para isso, é necessário que os aterros tenham uma estrutura adequada e condições para a comercialização dos excedentes gerados, permitindo atrativas taxas de retorno frente aos investimentos (COELHO et. al., 2004c).

O custo de produção da eletricidade com aproveitamento do biogás é composto do capital investido na construção e manutenção do biodigestor e do sistema de conversão energética.

A quantidade de biogás gerado depende de determinados fatores, dentre eles, o tempo de funcionamento do biodigestor, sob condições adequadas de operação e manutenção. O biogás

produzido pode ser utilizado diretamente no sistema de conversão energética, ou então, ser armazenado em um gasômetro antes de alimentar o sistema. Vale ressaltar que há necessidade de purificá-lo antes de convertê-lo em energia elétrica. Quanto menor for o tempo anual de operação do biodigestor, maior será o custo de geração de energia elétrica, aumentando, com isso, o tempo de retorno do investimento.

Para os cálculos abaixo, pode-se utilizar uma taxa de desconto de 16,22%<sup>12</sup>, a qual seria a taxa usual de financiamento do governo federal para o setor elétrico. Os gastos com O&M (Operação e Manutenção) durante o ano representam cerca de 4% do investimento total (SOUZA et. al., 2004). Por meio da tarifa de energia paga pela ETE, é possível obter o tempo de retorno do investimento. O custo de produção de energia elétrica via biogás é dado por:

$$C_e = \frac{CAG + CAB}{PE} \quad (1)$$

Em que

$C_e$  – custo de energia elétrica produzida via biogás (R\$/kWh)

$CAB$  – gasto anual com biogás (R\$/ano)

$CAG$  – custo anualizado do investimento no sistema de conversão energética (R\$/ano)

$PE$  – produção de eletricidade pela planta de biogás (kWh/ano)

Onde,

$$CAG = CIG \times FRC + CIG \times OM \quad (2)$$

$$CAB = CB \times CNB \quad (3)$$

Em que

$CIG$  – custo do investimento do sistema de conversão energética (R\$)

---

<sup>12</sup> Utiliza-se como base para essa taxa de desconto a remuneração de um título público brasileiro (15,75% lastreado pela SELIC) + um spread de 3% pelos riscos inerentes a esse tipo de projeto. Normalmente, no segmento energético, essa é a taxa requerida de retorno para a inversão de capital em projetos de escala pequena.

OM – porcentagem de custo de operação e manutenção em relação ao investimento total (%/ano)

CB – custo do biogás (R\$/m<sup>3</sup>)

CNB – consumo de biogás pelo sistema de conversão energética (m<sup>3</sup>/ano)

A PE ( capacidade de produção de eletricidade) é dada por:

$$PE = Pot \times F \quad (4)$$

Onde,

Pot – potência nominal da planta (kW)

F – fator de capacidade, considerando a quantidade média de eletricidade que pode ser gerada em um ano, dividido pela eletricidade gerada se a planta operasse o ano todo a plena capacidade

O fator de recuperação de capital é dado por:

$$FRC = \frac{J \times (1 + J)^n}{(1 + J)^{n-1} - 1} \quad (5)$$

Onde,

FRC – fator de recuperação de capital

J – taxa de desconto (% ano)

n = tempo de vida útil da planta

O custo do biogás é dado por:

$$CB = \frac{CAI}{PAB} \quad (6)$$

Onde,

CAI – custo anualizado do investimento no biodigestor (R\$/ano)

PAB – produção anual de biogás (m<sup>3</sup>/ano)

$$CAI = CIB \times FRC + CIB \times OM \quad (7)$$

Onde,

CIB – custo de investimento no biodigestor (R\$)

Para se verificar a viabilidade de geração de energia elétrica, determina-se o tempo de retorno simples do investimento (TRI):

$$TRI = \frac{CIG}{EEE} \quad (8)$$

Em que:

CIG – custo do investimento do sistema de conversão energética (R\$)

EEE – economia de energia elétrica na ETE (R\$/ano)

TRI – tempo de retorno de investimento (mês)

$$EEE = \frac{GEE \times PE}{CEE} \quad (9)$$

Onde:

GEE – gastos com energia elétrica na ETE (R\$/mês)

PE – produção de eletricidade pela planta de biogás (kWh/ano)

CEE – consumo de energia elétrica na ETE (kWh/mês)

#### **4.2 Comparação Econômica entre as Tecnologias de Conversão Energética do Biogás**

Para comparação entre as tecnologias pode-se citar o projeto ENERGBIOG – Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto, desenvolvido pelo CENBIO, financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) / CT – ENERGB, mediante convênio nº 23.01.0653.00, e pela SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo).

O referido projeto (Figura 15), pioneiro na América Latina, visou analisar a performance de microturbinas e motores ciclo Otto para geração de energia elétrica com biogás e a possibilidade de utilização destas tecnologias em outras ETE's do Estado de São Paulo. Para isso, cerca de 20 m<sup>3</sup>/h do biogás produzido na ETE da SABESP, em Barueri – SP, alimenta uma microturbina e um grupo gerador (ciclo Otto), em paralelo, ambos de 30 kW.



Figura 15. Instalação do projeto ENER-G-BIOG.  
Fonte: CENBIO, 2004e.

Os grupos geradores possuem custos de implementação, operação e manutenção inferiores aos das turbinas e microturbinas, de 350,00 a 1.500,00 US\$/kW instalado e de 3.000,00 a 4.000,00 US\$/kW instalado (CENBIO, 2004e), respectivamente. Isso se deve às diferenças entre cada tipo de tecnologia (componentes internos, tipo de material, princípio de funcionamento, etc.), bem como suas especificações de operação (pressão, temperatura, composição específica do gás, etc.) e manutenção (periódica, preventiva, corretiva e vida útil do equipamento).

#### 4.2.1 Geração de 30 kW (ISO) com uma Microturbina

- Consumo específico do biogás

Durante os testes de desempenho da microturbina, verificou-se que o consumo específico de biogás variava em função da potência exigida pelo equipamento. A Figura 16 mostra os dados coletados.

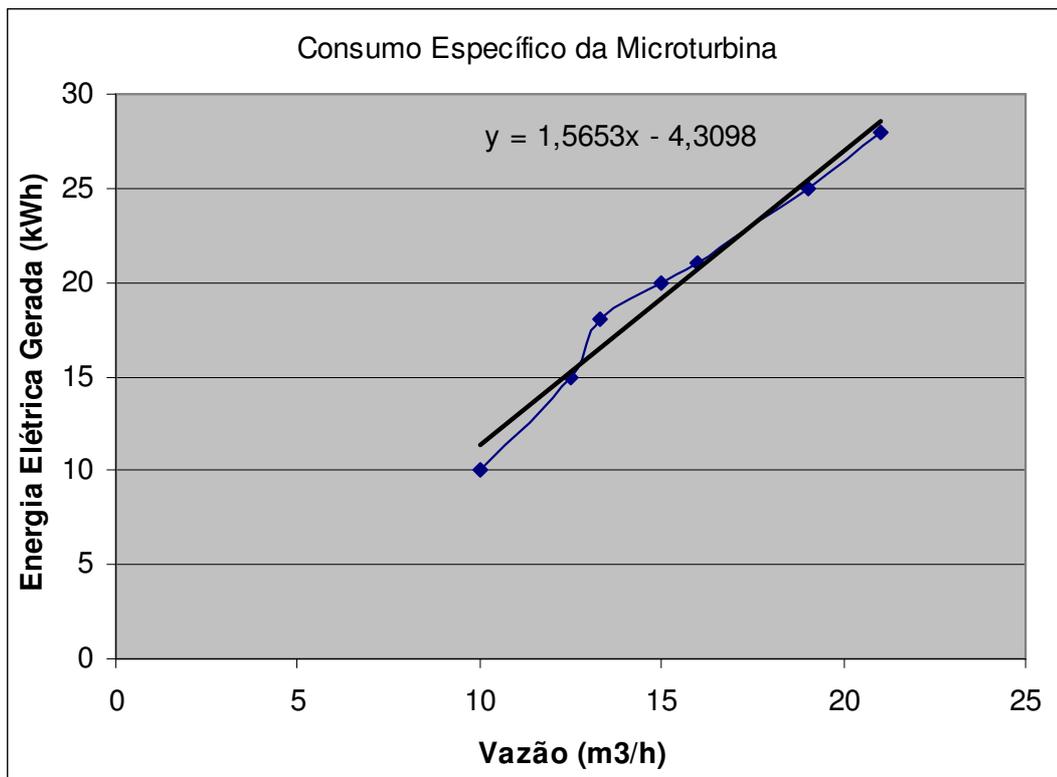


Figura 16. Consumo específico da microturbina.  
Fonte: CENBIO, 2006i.

Sendo assim, torna-se possível verificar o padrão de consumo específico médio da microturbina, que se encontra na Tabela 7, bem como a relação entre a vazão de biogás consumido pela microturbina e a energia elétrica líquida entregue à rede (Tabela 8).

Tabela 7. Relação entre a vazão de biogás consumido pela microturbina e a energia elétrica gerada pela mesma.

	$R_1 = \text{m}^3/\text{kW}$
Mínima	0,7985
Máxima	1,6641
Média	0,9871

Fonte: CENBIO, 2006i.

Onde,

$R_1$  = relação empírica entre a vazão de biogás consumido pela microturbina ( $m^3/h$ ) e a energia elétrica gerada pela mesma (kWh).

Tabela 8. Relação entre a vazão de biogás consumida pela microturbina e a energia elétrica líquida entregue à rede [Microturbina – (Compressor + Secador A + Secador B)].

	$R_1' = m^3/kW$
Mínima	1,2181
Máxima	1,7367
Média	1,5525

Fonte: CENBIO, 2006i

Onde,

$R_1'$  = relação empírica entre a vazão de biogás consumido pela microturbina ( $m^3/h$ ) e a energia elétrica líquida entregue à rede (kWh), ou seja, a energia gerada pela microturbina, descontando-se a energia consumida pelo sistema de compressão e purificação do biogás, compostos pelos dois secadores por refrigeração e o compressor.

- Energia elétrica líquida

A energia elétrica líquida entregue pelo sistema deve levar em conta a energia gerada pela microturbina, descontando-se a energia elétrica consumida pelo compressor e pelos dois secadores do biogás por refrigeração. Dessa forma, tem-se que:

- $M_{eem}$  – Média da energia elétrica gerada pela microturbina por hora = 25,0 kWh;
- $M_{eccc}$  – Média da energia elétrica consumida pelo compressor por hora = 4,45 kWh;
- $M_{eecsA}$  – Média da energia elétrica consumida pelo secador A por hora = 0,65 kWh;
- $M_{eecsB}$  – Média da energia elétrica consumida pelo secador B por hora = 0,40 kWh.

Assim sendo, torna-se possível calcular a energia elétrica líquida entregue à rede pelo sistema:

$$\text{Energia elétrica líquida entregue à rede (kWh)} = Meem - (Meecc + MeecsA + MeecsB) \quad (10)$$

$$\text{Energia elétrica líquida entregue à rede (kWh)} = 25 - (4,45 + 0,65 + 0,40)$$

$$\text{Energia elétrica líquida entregue à rede (kWh)} = 19,5 \text{ kWh}$$

- Análise econômica

Para o início da avaliação dos dados obtidos durante o projeto, consideramos a vida útil da microturbina em 40.000 horas, de acordo com seu fabricante. A Tabela 9 mostra os custos com os equipamentos, materiais e acessórios realmente necessários para a geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto, utilizando uma microturbina de 30 kW de potência nominal. Não foram considerados os custos com automação e monitoramento.

Tabela 9. Custo dos equipamentos, materiais e acessórios para a geração de energia elétrica, a partir do biogás de tratamento de esgoto, utilizando uma microturbina de 30 kW.

Equipamentos	Modelo	Quant.	Custo (R\$)*
Microturbina de 30 kW a Biogás	C330	1	109.756,10
Compressor de Palhetas	V04G	1	24.630,30
Secador por Refrigeração	CRD0230	1	3.800,00
Secador por Refrigeração	CRD0055	1	1.600,00
Filtro Coalescente	CF0036	3	2.400,00
Filtro de Carvão Ativado	CF0036	1	800,00
Tubulação	Aço inox	20 m	1.800,00
Válvulas esfera	Aço inox	6	720,00
Conexões	Aço inox	7	140,00
Tubulação de exaustão com isolamento térmico	Aço carb.	4 m	2.400
Obra civil	Concreto	18 m <sup>2</sup>	3.000,00
<b>Investimento total em equipamentos</b>			<b>151.046,40</b>

(\*) Os preços acima descritos foram baseados no Dólar comercial de venda do dia 01/04/2002 (1 US\$ = 2,2935 R\$) e não incluem IPI.

Fonte: CENBIO, 2006i.

De posse do custo total de investimento em equipamentos, pode-se calcular a relação de custo por kW instalado.

$$R_2(R\$/kW) = \frac{\text{Investimento} \cdot \text{total} \cdot \text{em} \cdot \text{equipamentos}}{\text{Potência} \cdot \text{Instalada}} \quad (11)$$

$$R_2(R\$/kW) = \frac{151.046,40}{30}$$

$$R_2 = 5.034,88 \text{ R\$/kW}$$

Foi considerado que a microturbina tem potência de 30 kW nas condições ISO, ou seja, pressão de 1 atmosfera (nível do mar) e temperatura de 15 °C. No caso da microturbina instalada na ETE da SABESP, em Barueri, deve-se considerar as variações de pressão e temperatura, fatores que causam perda no rendimento do equipamento, reduzindo a potência máxima a 28 kW. A energia elétrica média gerada pela microturbina foi considerada sendo 25 kWh por hora, pois 90% de carga é a faixa de melhor rendimento do equipamento. Para isso estamos admitindo que a turbina opera sem paradas durante o ano todo (o que pode ser uma hipótese otimista) Porém, também deve ser levado em conta que, para a operação adequada da microturbina, torna-se necessária a utilização do sistema de purificação e compressão do biogás, que incluem equipamentos como os secadores por refrigeração e o compressor, que consomem energia elétrica em média 5,5 kWh por hora. Sendo assim, a energia elétrica líquida entregue à rede é de 19,5 kWh por hora.

Portanto, a partir da análise técnica e admitindo-se três cenários, tem-se que:

- Energia elétrica horária gerada pela microturbina (Eg):
  - Mínima: 23 kWh
  - Máxima: 28 kWh
  - Média: 25 kWh
- Energia elétrica horária consumida pelos dois secadores e pelo compressor (Ec):
  - Mínima: 4,5 kWh
  - Máxima: 6,5 kWh

- Média: 5,5 kWh

Com base nesses dados foi possível calcular a energia elétrica líquida horária (E.E.L.) entregue à rede:

$$E.E.L. = E_g - E_c \quad (12)$$

$$E.E.L. = 25 - 5,5$$

$$E.E.L. = 19,5 \text{ kWh}$$

Com base nesses cálculos, surge uma nova relação de custo pelo kW instalado:

$$R_2' (R\$/kW) = \frac{\text{Investimento} \cdot \text{total} \cdot \text{em} \cdot \text{equipamentos}}{\text{Potência} \cdot \text{Instalada}} \quad (13)$$

$$R_2' (R\$/kW) = \frac{151.046,40}{19,5}$$

$$R_2' = 7.745,97 \text{ R\$/kW}$$

#### 4.2.2 Geração de 30 kW (ISO) com um Grupo Gerador

- Consumo específico do biogás

A Tabela 10 apresenta a vazão de biogás consumido pelo grupo gerador e a energia elétrica gerada pelo mesmo.

Tabela 10. Relação entre a vazão de biogás consumido pelo grupo-gerador e a energia elétrica gerada pelo mesmo.

	$R_1 = \text{m}^3/\text{kW}$
Mínima	0,3
Máxima	0,5
Média	0,4

Fonte: CENBIO, 2006i.

Onde,

$R_1$  = relação empírica, de acordo com o fabricante do equipamento, entre a vazão de biogás consumido pelo grupo gerador ( $m^3/h$ ) e a energia elétrica gerada pelo mesmo (kWh).

- Energia elétrica líquida

A energia elétrica líquida entregue pelo sistema levou em conta a energia gerada pelo grupo gerador, descontando-se somente a perda na eficiência do equipamento devido à variação de pressão e temperatura, fatores estes que acabam reduzindo a capacidade horária de geração de energia máxima para um valor entre 25 e 28 kWh.

- Análise econômica

Para a avaliação do custo de geração com um grupo gerador foi considerada a vida útil do equipamento de 5.000 horas, de acordo com seu fabricante. Os custos totais com equipamentos, materiais e acessórios foram de R\$ 24.680,00 (Tabela 11). Não foram considerados os custos com automação e monitoramento.

Tabela 11. Custo dos equipamentos, materiais e acessórios para a geração de energia elétrica, a partir do biogás de tratamento de esgoto, utilizando uma grupo gerador de 30 kW.

Equipamentos	Modelo	Quant.	Custo (R\$)*
Grupo gerador de 30 kW a Biogás	Triernet	1	21.200,00
Tubulação	Aço inox	4 m	360,00
Válvulas esfera	Aço inox	2	240,00
Conexões	Aço inox	4	80,00
Tubulação de exaustão com isolamento térmico	Aço carb.	3 m	1.800,00
Obra civil	Concreto	6 m <sup>2</sup>	1.000,00
<b>Investimento total em equipamentos</b>			<b>24.680,00</b>

(\*) Os preços acima descritos foram baseados no Dólar comercial de venda do dia 01/04/2002 (1 US\$ = 2,2935 R\$) e não incluem IPI.

Fonte: CENBIO, 2006i.

De posse do custo total de investimento em equipamentos, pôde-se calcular a relação de custo pelo kW instalado:

$$R_3(R\$/kW) = \frac{\text{Investimento} \cdot \text{total} \cdot \text{em} \cdot \text{equipamentos}}{\text{Potência} \cdot \text{Instalada}} \quad (14)$$

$$R_3(R\$/kW) = \frac{24.680,00}{30}$$

$$R_3 = 822,67 \text{ R\$/kW}$$

Outro fator considerado é que o grupo gerador tem potência de 30 kW nas condições estabelecidas pelo seu fabricante, ou seja, pressão de 1 atmosfera (nível do mar) e temperatura de 20 °C. No caso do grupo gerador instalado na ETE da SABESP, em Barueri, também se considerou uma variação de pressão e temperatura, fatores estes que causam uma perda no rendimento do equipamento, reduzindo a potência líquida a valores entre 25 e 28 kW.

Com base nessa afirmação, surgiu uma nova relação de custo pelo kW instalado:

$$R'_3(R\$/kW) = \frac{\text{Investimento} \cdot \text{total} \cdot \text{em} \cdot \text{equipamentos}}{\text{Potência} \cdot \text{Gerada}} \quad (15)$$

$$R'_3(R\$/kW) = \frac{24.680,00}{25}$$

$$R'_3 = 987,20 \text{ R\$/kW}$$

O tempo de vida útil do grupo gerador equivale a 1/8 do da vida útil da microturbina. Isso implica, por uma questão de equivalência, a correção das relações de custo pelo kW instalado de 8 vezes. Contudo, o recondicionamento do grupo gerador equivale a 1/3 do custo inicial, enquanto que no caso da microturbina, a troca do corpo da turbina representa um valor semelhante ao do investimento inicial. Para um regime de 40.000 horas de operação, no caso do motor, foi considerado um investimento inicial de R\$ 24.680,00 (TE) mais 7 vezes o valor do recondicionamento do motor (RE). O Valor Presente desses gastos é obtido considerando que

cada recondiçionamento é feito após 4.000 horas (meio ano) e, portanto o custo de cada recondiçionamento é trazido ao ano inicial considerando a taxa de juros suposta (16,22% a.a.) aplicada a cada investimento em valor que represente o número de anos após o qual é feito (para meio ano assumimos taxa de 7,80% (JS):

$$R_4(R\$/kW) = \frac{TE + \frac{RE}{\left(1 + \frac{JS}{100}\right)} + \frac{RE}{\left(1 + \frac{JS}{100}\right)^2} + \frac{RE}{\left(1 + \frac{JS}{100}\right)^3} + \dots + \frac{RE}{\left(1 + \frac{JS}{100}\right)^7}}{Potência \cdot Instalada} \quad (16)$$

$$R_4(R\$/kW) = \frac{24.680,00 + \frac{8.226,67}{\left(1 + \frac{7,80}{100}\right)} + \frac{8.226,67}{\left(1 + \frac{7,80}{100}\right)^2} + \frac{8.226,67}{\left(1 + \frac{7,80}{100}\right)^3} + \dots + \frac{8.226,67}{\left(1 + \frac{7,80}{100}\right)^7}}{30}$$

$$R_4(R\$/kW) = \frac{24.680,00 + 43.125,63}{30}$$

$$R_4 = 2.260,19R\$/kW$$

$$R'_4(R\$/kW) = \frac{TE + \frac{RE}{\left(1 + \frac{JS}{100}\right)} + \frac{RE}{\left(1 + \frac{JS}{100}\right)^2} + \frac{RE}{\left(1 + \frac{JS}{100}\right)^3} + \dots + \frac{RE}{\left(1 + \frac{JS}{100}\right)^7}}{Potência \cdot Gerada} \quad (17)$$

$$R'_4(R\$/kW) = \frac{24.680,00 + \frac{8.226,67}{\left(1 + \frac{7,80}{100}\right)} + \frac{8.226,67}{\left(1 + \frac{7,80}{100}\right)^2} + \frac{8.226,67}{\left(1 + \frac{7,80}{100}\right)^3} + \dots + \frac{8.226,67}{\left(1 + \frac{7,80}{100}\right)^7}}{25}$$

$$R'_4(R\$/kW) = \frac{24.680,00 + 43.125,63}{25}$$

$$R_4' = 2.712,23 \text{ R\$/kW}$$

### **4.2.3 Custo de Operação e Manutenção dos Sistemas**

Para o levantamento dos custos de operação e manutenção foi necessário computar os custos de operação, referentes aos gastos com a mão de obra para operar o sistema e o custo do combustível necessário. Os custos de manutenção são referentes aos gastos com substituição de filtros, injetores e qualquer outro tipo de componente.

Em ambos os casos analisados, os custos de mão-de-obra e combustível foram considerados nulos. Não se atribuiu valores à mão-de-obra para operação, uma vez que essa atividade foi incorporada à rotina de trabalho já existente na planta, não sendo necessária a contratação de novos funcionários. O custo do combustível foi considerado nulo em função da disponibilidade de biogás na ETE da SABESP, em Barueri, tendo em vista que o gás gerado é um subproduto do processo anaeróbico de tratamento de esgoto na estação.

#### **4.2.3.1 Custo de Operação e Manutenção da Microturbina**

Para o levantamento dos custos de manutenção da microturbina, foram considerados os padrões indicados no Manual de Serviços, fornecido pelo fabricante, e seus respectivos indicadores de inspeção, intervalos de manutenção e troca de componentes. Os custos relacionados aos itens listados na Tabela 12, fornecidos pela ENEDIS, representante de microturbinas na América Latina, consideram os custos individuais dos componentes, impostos com importação, despesas alfandegárias e impostos locais.

Tabela 12. Manutenção preventiva da microturbina.

<b>MICROTURBINA</b>				
<b>Componente</b>	<b>Inspecção e intervalo</b>	<b>Manutenção e intervalo</b>	<b>Custo O&amp;M*</b>	<b>Custo O&amp;M* (vida útil do equipamento)**</b>
Filtro de ar da Turbina	Limpeza a cada 6 meses ou 4.000 horas	Troca a cada 8.000 horas	R\$ 317,88	R\$ 1.035,51
Filtro de admissão de combustível (sistema interno de gás)	Limpeza a cada 6 meses ou 4.000 horas	Inspecionar a cada 20.000 horas	R\$ 3.027,88	R\$ 3.672,65
Filtro de admissão de combustível (externo)	Limpeza a cada 6 meses ou 4.000 horas	Troca a cada 8.000 horas	R\$ 3.085,67	R\$ 10.051,76
Ignitor (sistema de gás)	.....	Troca a cada 20.000 horas	R\$ 979,32	R\$ 1.187,86
Conjunto dos injetores (sistema de gás)	.....	Troca a cada 20.000 horas	R\$ 3.018,25	R\$ 3.661,00
TET Termopar (sistema de gás)	.....	Troca a cada 20.000 horas	R\$ 738,51	R\$ 895,77

(\*) Os preços acima descritos foram baseados no Dólar comercial de venda do dia 01/04/2002 (1 US\$ = 2,2935 R\$).

(\*\*) O “Custo O&M (vida útil do equipamento)” é uma projeção do “Custo O&M”, ou seja, leva em consideração os tempos de intervalos de manutenção de cada componente em função do tempo de vida útil da microturbina, estimado em 40.000 horas, de acordo com o fabricante do equipamento, a valor presente.

Todos os valores foram calculados a partir da taxa de juros considerada 16,22% a.a., sendo que 8.000 horas foi aproximado para 1 ano.

Fonte: CENBIO, 2006i.

Com base nestas informações, foi calculado o custo total de operação e manutenção da microturbina, no valor de R\$ 20.504,55, para um regime de operação de 40.000 horas.

Para o levantamento dos custos de manutenção do sistema de purificação e compressão do biogás, foram considerados os itens listados nos Manuais dos Equipamentos, fornecidos pelos fabricantes, e seus respectivos indicadores de inspeções, intervalos de manutenção e troca de componentes. Foram considerados, também, custos individuais dos componentes, impostos com importação, despesas alfandegárias e impostos locais (Tabela 13). Estes custos totalizaram R\$ 76.301,41, para um regime de 40.000 horas.

Tabela 13. Manutenção preventiva dos componentes do sistema de limpeza do biogás para a microturbina.

<b>SISTEMA DE PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS PARA A MICROTURBINA</b>				
<b>Componente</b>	<b>Inspeção e intervalo</b>	<b>Manutenção e intervalo</b>	<b>Custo O&amp;M*</b>	<b>Custo O&amp;M* (vida útil do equipamento)**</b>
Filtro Coalescente 1 (Bancada 1)	.....	Troca do elemento filtrante a cada 10.000 horas	R\$ 802,73	R\$ 2.129,51
Filtro de Carvão Ativado (Bancada 1)	.....	Troca do carvão ativado a cada 10.000 horas	R\$ 802,73	R\$ 2.129,51
Secador por Refrigeração 1	Verificar a tensão a cada 2.000 horas	Limpeza interna e troca de peças internas avariadas a cada 8.000 horas	R\$ 3.807,21	R\$ 12.402,22
Compressor de Palhetas	Verificar a tensão e trocar o óleo a cada 1.000 horas	Limpeza interna das válvulas, do elemento compressor e troca de peças internas avariadas a cada 2.000 horas	R\$ 3.296,10	R\$ 46.845,50
Filtro Coalescente 2 (Bancada 2)	.....	Troca do elemento filtrante a cada 4.000 horas	R\$ 802,73	R\$ 5.435,31
Secador por Refrigeração 2	Verificar a tensão a cada 2.000 horas	Limpeza interna e troca de peças internas avariadas a cada 8.000 horas	R\$ 1.605,45	R\$ 5.229,85
Filtro Coalescente 3 (Bancada 3)	.....	Troca do elemento filtrante a cada 10.000 horas	R\$ 802,73	R\$ 2.129,51

(\*) Os preços acima descritos estão baseados no Dólar comercial de venda do dia 01/04/2002 (1 US\$ = 2,2935 R\$).

(\*\*) O “Custo O&M (vida útil do equipamento)” é uma projeção do “Custo O&M”, ou seja, leva em consideração os tempos de intervalos de manutenção de cada componente em função do tempo de vida útil da microturbina, estimado em 40.000 horas, de acordo com o fabricante do equipamento, a valor presente.

Todos os valores foram calculados a partir da taxa de juros considerada 16,22% a.a., sendo que 8.000 horas foi aproximado para 1 ano.

Fonte: CENBIO, 2006i.

De posse destes dados, pôde-se calcular a relação de custo de operação e manutenção da energia elétrica gerada. Para tanto, os seguintes dados foram considerados:

- Custo total de operação e manutenção = 20.504,55 (R\$) + 76.301,41 (R\$) = R\$ 96.805,96
- Média de energia elétrica líquida horária entregue à rede pelo sistema = 19,5 kWh
- Regime de operação = 24 horas
- Vida útil da microturbina = 40.000 horas

$$R_5 = \frac{\text{Custo} \cdot \text{total} \cdot \text{de} \cdot \text{O} \& \text{M}}{\text{Média} \cdot \text{de} \cdot \text{energia} \cdot \text{elétrica} \cdot \text{líquida} \cdot \text{horária} \times \text{Vida} \cdot \text{útil} \cdot \text{da} \cdot \text{microturbina}} \quad (18)$$

$$R_5 = \frac{96.805,96}{19,5(kW) \times 40.000(h)}$$

$$R_5 = 0,1241 \text{ R\$/kWh}$$

- Custo de geração da microturbina

O custo de geração com a microturbina levou em conta o investimento total com equipamentos da instalação, somando os custos de operação e manutenção, em função da energia elétrica disponibilizada pelo sistema, considerando seu regime de operação e o tempo de vida útil do equipamento gerador.

$$R_6 = \frac{\text{Custo} \cdot \text{total} \cdot \text{com} \cdot \text{equipamentos} + \text{Custo} \cdot \text{total} \cdot \text{de} \cdot \text{O} \& \text{M}}{\text{Média} \cdot \text{de} \cdot \text{energia} \cdot \text{elétrica} \cdot \text{líquida} \cdot \text{horária} \times \text{Vida} \cdot \text{útil} \cdot \text{da} \cdot \text{microturbina}} \quad (19)$$

$$R_6 = \frac{151.046,40 + 96.805,96}{19,5(kW) \times 40.000(h)}$$

$$R_6 = 0,3178 \text{ R\$/kWh}$$

#### 4.2.3.2 Custo de Operação e Manutenção do Grupo Gerador

Para o levantamento dos custos de manutenção do grupo gerador, foram considerados os itens listados no Manual do Equipamento, fornecido pelo fabricante, e seus respectivos indicadores de inspeção, intervalos de manutenção e troca de componentes. Os custos relacionados aos itens listados na Tabela 14, baseados em fornecedores de São Paulo, consideram os custos individuais dos componentes e impostos locais.

Tabela 14. Manutenção preventiva do grupo-gerador.

<b>GRUPO GERADOR</b>				
<b>Componente</b>	<b>Inspeção e intervalo</b>	<b>Manutenção e intervalo</b>	<b>Custo O&amp;M*</b>	<b>Custo O&amp;M* (vida útil do equipamento)**</b>
Óleo lubrificante	Troca do óleo a cada 200 horas	Troca do filtro a cada 400 horas	R\$ 101,00	R\$ 1.205,63
Filtro de ar	Limpeza a cada 1.000 horas	Troca do filtro a cada 2.000 horas	R\$ 15,00	R\$ 35,26
Sistema de combustível	Limpeza dos filtros a cada 200 horas	Limpeza da válvula de gás a cada 2.000 horas	R\$ 80,00	R\$ 188,05
Sistema de refrigeração	Verificar a tensão da correia a cada 200 horas	Troca do líquido refrigerante, da correia dentada e do esticador da correia a cada 1.000 horas	R\$ 221,00	R\$ 1.049,87
Alternador	Verificar rolamentos a cada 400 horas	Troca da correia e do jogo de velas a cada 1.000 horas e troca dos rolamentos a cada 2.000 horas	R\$ 298,00	R\$ 700,50

Continuação Tabela 14. Manutenção preventiva do grupo-gerador.

GRUPO GERADOR				
Rolamento do gerador	Lubrificar a cada 1.000 horas	.....	R\$ 10,00	R\$ 47,51

(\*) Os preços acima descritos foram baseados no Dólar comercial de venda do dia 01/04/2002 (1 US\$ = 2,2935 R\$).

(\*\*) O “Custo O&M (vida útil do equipamento)” é uma projeção do “Custo O&M”, ou seja, leva em consideração os tempos de intervalos de manutenção de cada componente em função do tempo de vida útil do grupo gerador, estimado em 5.000 horas, de acordo com o fabricante do equipamento, a valor presente.

Todos os valores foram calculados a partir da taxa de juros considerada 16,22% a.a., sendo que 8.000 horas foi aproximado para 1 ano.

Fonte: CENBIO, 2006i.

Com base nestas informações, obtém-se o custo total de operação e manutenção do sistema do grupo gerador, ou seja, R\$ 3.226,82 para um regime de operação de 5.000 horas.

De posse destes dados, pôde-se calcular a relação de custo de operação e manutenção em função da energia elétrica gerada. Para tanto, os seguintes dados foram considerados:

- Custo total de operação e manutenção = 3.400,00 (R\$)
- Média de energia elétrica líquida entregue à rede pelo sistema = 25 kW
- Regime de operação = 24 horas
- Vida útil do grupo gerador = 5.000 horas

$$R_7 = \frac{\text{Custo total de O \& M}}{\text{Média de energia elétrica líquida horária} \times \text{Vida útil do grupo gerador}} \quad (20)$$

$$R_7 = \frac{3.226,82}{25(kW) \times 5.000(h)}$$

$$R_7 = 0,0258 \text{ R\$/kWh}$$

- Custo de geração do grupo gerador

O custo de geração com o grupo gerador levou em conta o investimento total com equipamentos da instalação, somando os custos de operação e manutenção, em função da energia

elétrica disponibilizada pelo sistema, considerando seu regime de operação e o tempo de vida útil do equipamento gerador.

De posse dos dados, pôde-se calcular a relação de custo total do sistema pelo kW gerado pelo mesmo (R\$/kWh).

$$R_8 = \frac{\text{Custo} \cdot \text{total} \cdot \text{com} \cdot \text{equipamentos} + \text{Custo} \cdot \text{total} \cdot \text{de} \cdot \text{O} \& \text{M}}{\text{Média} \cdot \text{de} \cdot \text{energia} \cdot \text{elétrica} \cdot \text{líquida} \cdot \text{horária} \times \text{Vida} \cdot \text{útil} \cdot \text{do} \cdot \text{grupo} \cdot \text{gerador}} \quad (21)$$

$$R_8 = \frac{24.680,00 + 3.226,82}{25(\text{kW}) \times 5.000(\text{h})}$$

$$R_8 = 0,2233 \text{ R\$/kWh}$$

#### 4.3 Relação de Custos entre as Tecnologias

A partir dos dados apresentados, torna-se possível calcular o fluxo de caixa para os dois sistemas em questão. Entretanto, foram considerados os seguintes casos (COSTA, 2006):

- Adotou-se o período de 3 meses para a construção das novas unidades;
- Os valores referentes à O&M da microturbina e do grupo gerador foram distribuídos durante os semestres dos projetos e considerados seus valores presentes;
- O recondicionamento do grupo gerador é feito em tempo desprezível. A energia gerada pelos equipamentos será interligada à rede, abatendo do consumo da estação. Assim, a receita do projeto fica vinculada com a quantidade de energia deslocada da rede, multiplicada pelo valor médio da tarifa de energia cobrada pela concessionária às ETE's de menor porte, adotado aqui como R\$ 0,20 por kWh;
- Energia elétrica horária líquida entregue à rede pela microturbina: 19,5 kWh;
- Energia elétrica horária líquida entregue à rede pelo grupo gerador: 25 kWh;
- A vida útil da microturbina é de 40.000 horas e do grupo gerador é de 5.000 horas. Para equalizar o período compreendido na análise de investimento, o regime de 40.000 horas de operação será adotado para ambos os casos;

- Fator de capacidade de operação: 80% ou 0,8, considerando o tempo de 8.760 horas por ano;
- Não haverá financiamento;
- Considera-se somente os custos de O&M e CAPEX<sup>13</sup>
- Taxa de juros adotada: 16,22%;
- O modelo desconsidera a inflação durante o período analisado.

Diante do exposto, pode-se projetar o fluxo de caixa (Anexo A).

Por meio da análise do Valor Presente Líquido (VPL) dos fluxos de caixa descontados, prevalece a viabilidade do projeto que utiliza o grupo gerador em relação ao da microturbina, pois apresenta um menor custo inicial atrelado aos menores custos de O&M. Assim, a vantagem da utilização da microturbina está relacionada diretamente à questão ambiental, pois há menor emissão de NOx.

Esta análise permite concluir que o problema para ambas as tecnologias é o preço elevado dos equipamentos, em virtude da pequena escala de produção, necessitando maiores incentivos para sua viabilização em maiores quantidades.

Geralmente, a avaliação de equilíbrio econômico leva em conta apenas os fatores que compõem o fluxo de caixa do empreendimento, que são o pagamento do financiamento somado aos custos de manutenção mais as taxas, sendo compensados pela venda de eletricidade num determinado período. A diferença dessa equação define o lucro que o investidor avalia ser ou não compensador frente a outras opções de investimento (COSTA, 2006).

Através do fluxo de caixa, pode-se observar que essa prática não é economicamente viável.

#### **4.4 Custo Médio da Energia Elétrica Consumida pela ETE da SABESP em Barueri – SP**

O consumo de energia elétrica da ETE da SABESP, em Barueri, foi levantado por meio de uma conta apresentada pela mesma, referente ao mês de fevereiro de 2003, época em que o projeto ENER-G-BIOG encontrava-se em andamento. Observou-se que o tipo de tarifação da ETE classifica-se como “Azul Alta Tensão – Serviço Público – Sub-grupo A2”. Por meio deste tipo de

---

<sup>13</sup> CAPEX: *Capital Expenditures*, isto é, Investimento em Capital Fixo.

tarifação, a estação possui uma demanda contratada de potência de 9.400 kW (ponta) a 10.500 kW (fora de ponta), pagando de 0,059 R\$/kWh a 0,087 R\$/kWh, o que resulta em um total de aproximadamente R\$ 780.000,00 mensais (incluindo os impostos) somente com custos de energia elétrica. Estima-se, que usando todo o biogás produzido nessa ETE, atualmente poderia se ter uma capacidade instalada de 2,6 MWe, o que corresponde a aproximadamente 25% do consumo energético da estação (COSTA, 2006).

Considerando que todo o biogás formado da ETE de Barueri fosse utilizado para geração de energia elétrica, a estação economizaria cerca de R\$ 195.000,00 mensalmente. Para concluir a viabilidade econômica do projeto, deve-se considerar os investimentos iniciais, além da operação e manutenção do sistema.

O preço da energia elétrica varia de acordo com o tipo de consumidor e a quantidade de energia comprada. No caso de grandes consumidores, como por exemplo, a SABESP, a energia pode ser comprada no mercado livre ou mesmo no mercado regulado, pagando mais barato o kWh que os pequenos consumidores. Este fato acaba comprometendo a viabilidade econômica do projeto em questão, uma vez que se torna mais viável comprar eletricidade da rede do que gerar energia com o próprio biogás da estação. Já para pequenos consumidores, que o preço da eletricidade é maior, um projeto de recuperação energética do biogás pode ser viável.

## **5. ASPECTOS SÓCIO-AMBIENTAIS**

### **5.1 O Esgoto e seus Impactos**

O esgoto é comumente referenciado a despejos em geral, sendo estes de origem doméstica, industrial, comercial, de áreas agrícolas, entre outros.

O esgoto sanitário é predominantemente constituído de despejos domésticos. Basicamente é composto por urina, fezes, restos de comida, papel, sabão, detergente, águas de banho e lavagem em geral, entre outros. Seus diversos constituintes podem ser reunidos em 4 grupos: sólidos em suspensão, matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos.

Os efeitos destes constituintes, quando lançados em excesso no meio ambiente, ou mais especificamente nos corpos receptores, provocam conseqüências desastrosas, muitas vezes com difícil recuperação. Este processo está vinculado principalmente ao acúmulo de nitrogênio e fósforo no ambiente, assim como o aumento da DBO nos corpos d'água (CENBIO, 2004f).

O esgoto em geral tem uma formação complexa. Além da matéria orgânica, também possui areia, sais, nutrientes e outros despejos das mais variadas origens. Nem sempre consegue-se a retirada de todos os materiais numa única unidade, por este motivo as ETE's são complexas, tendo várias unidades com objetivos diferentes.

O tratamento de esgoto pode ser separado em processo e operação. A operação consiste na fase física do tratamento, como a decantação e sedimentação. Os processos são as fases química e biológica, como a desinfecção e a digestão. Podem também ser classificados como tratamento preliminar, primário, secundário e terciário.

Para o tratamento preliminar, onde remove-se apenas os sólidos grosseiros, gorduras e sólidos sedimentáveis (areia), os tipos de tratamento mais comuns são: sistema de gradeamento, seguidos de caixa de areia e gordura, possibilidade do uso de flutuadores (indicado no caso de alta taxa de gordura).

O tratamento primário consiste na remoção de sólidos sedimentáveis através de operações físicas. A tendência continua sendo os decantadores primários e os floculadores. Esta fase é de fundamental importância, pois, além de apresentar baixo custo, reduz bastante as impurezas contidas no esgoto.

O tratamento secundário (biológico), consiste na remoção da matéria orgânica e consequentemente na diminuição da DBO. Os tipos mais conhecidos são: lagoa facultativa, lagoa aerada, lodos ativados, filtro biológico aeróbio, fossas sépticas, digestores anaeróbios, entre outros.

O tratamento terciário compreende atividades complementares ao tratamento secundário, como remoção de nutrientes, desinfecção e remoção de complexos orgânicos.

A finalidade do tratamento do esgoto é reduzir o teor de agentes contaminantes a ponto dos subprodutos finais poderem ser reutilizados ou devolvidos ao meio ambiente, sem que ocorra impactos negativos, tais como: alterações na qualidade dos corpos d'água.

O número de bactérias contidas no esgoto é muito grande. As bactérias coliformes – típicas do intestino de mamíferos – não constituem, sozinhas, um perigo, mas sendo êntero-bactérias, são associadas a microorganismos patogênicos, provenientes das necessidades fisiológicas humanas.

O esgoto pode conter bactérias agentes de cólera, das febres tifóides e paratifóides, salmonelas causadores de gastro-interites, leptospiros, bacilo de tuberculose, vírus causadores de poliometite e de hepatite, dentre outros.

## **5.2 Aspectos da Poluição Atmosférica e suas Interações com o Meio Ambiente**

Dá-se o nome de poluição à degradação da qualidade ambiental resultante das atividades que direta ou indiretamente prejudiquem a saúde, a segurança e o bem estar da população; crie condições adversas às atividades sociais e econômicas; afetem desfavoravelmente a fauna e a flora; afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981) (LIMA-E-SILVA et al., 2002).

A poluição atmosférica caracteriza-se basicamente pela inserção de poluentes na atmosfera. Os poluentes são substâncias ou agentes físicos que provocam, de forma direta ou indireta, qualquer alteração ou efeito adverso no ambiente, seja nos ecossistemas ou na saúde humana. Na verdade, qualquer substância artificial, mesmo que inicialmente não poluente, se adicionada a um meio acima de sua capacidade assimilativa, pode se tornar, para este meio, um poluente (LIMA-E-SILVA et al., 2002).

Os poluentes podem ser classificados como (LIMA-E-SILVA et al., 2002):

- Poluente primário: poluente que é emitido diretamente para o ambiente sem sofrer qualquer alteração da sua estrutura química ou interagir previamente com o meio no qual está sendo lançado;
- Poluente secundário: poluente que é derivado da mistura entre dois ou mais poluentes primários, ou entre um poluente primário e substâncias normalmente presentes no meio em que foi lançado;
- Poluente prioritário: substância considerada principal causadora de danos ao ambiente.

Além dos danos provocados nos ecossistemas e na saúde humana, a poluição atmosférica acarreta outra importante consequência: o surgimento e a expansão de um buraco na camada de ozônio.

O ozônio é um gás que se encontra principalmente entre 20 e 50 km de altitude, formando uma camada protetora em torno da Terra, contra as radiações ultravioletas (UV) provenientes do Sol (PRONACI, 2002). Esta camada é danificada principalmente pela emissão de uma família de químicos denominados Cloro-Fluor-Carbono (CFC's), que ao atingirem estas altitudes se combinam com o gás ozônio através de reações químicas e provocam a diminuição da espessura da camada de ozônio, tornando o nosso planeta mais vulnerável aos efeitos do UV.

Uma parte da radiação solar que atinge a superfície da Terra é absorvida, mas a outra é refletida sob a forma de radiação infra-vermelha que é absorvida por alguns gases que constituem a atmosfera (dióxido de carbono – CO<sub>2</sub> –, entre outros).

A estes gases damos o nome de gases efeito estufa (GEE's), e são eles que permitem que a atmosfera funcione como uma estufa natural, deixando a radiação proveniente do sol entrar, mas impedindo-a de sair, de maneira a permitir temperaturas constantes e ideais para o desenvolvimento da vida na crosta terrestre.

A problemática do Aquecimento Global que sofremos atualmente se dá, pois estes gases estão se acumulando em demasia na atmosfera, devido ao aumento das emissões de GEE's, permitindo que apenas uma pequena quantidade de calor seja expelida para o espaço.

Foi observado um aumento na temperatura média da superfície do planeta nos últimos 140 anos, conforme a Figura 17. Existem evidências científicas de que, pelo menos parcialmente, este aumento seja devido às emissões de gases efeito estufa pelas atividades humanas.

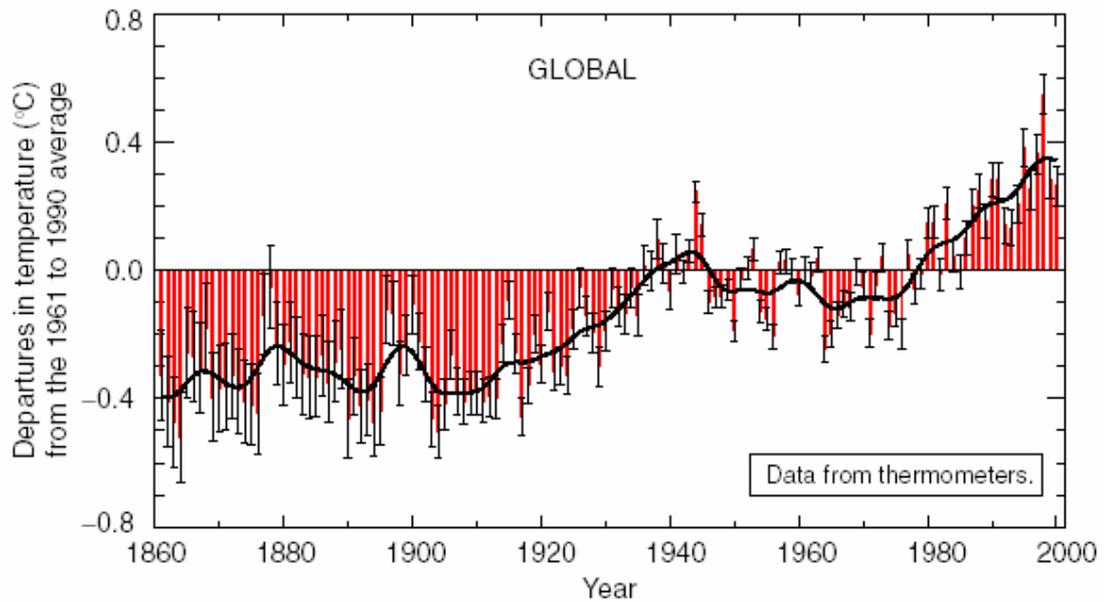


Figura 17. Aumento da temperatura global.  
Fonte: IPCC, 2001.

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é o gás responsável por mais da metade do aquecimento global, no entanto, existem outros gases que provocam o mesmo efeito, como o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Os gráficos abaixo mostram o aumento da concentração de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  desde a revolução industrial.

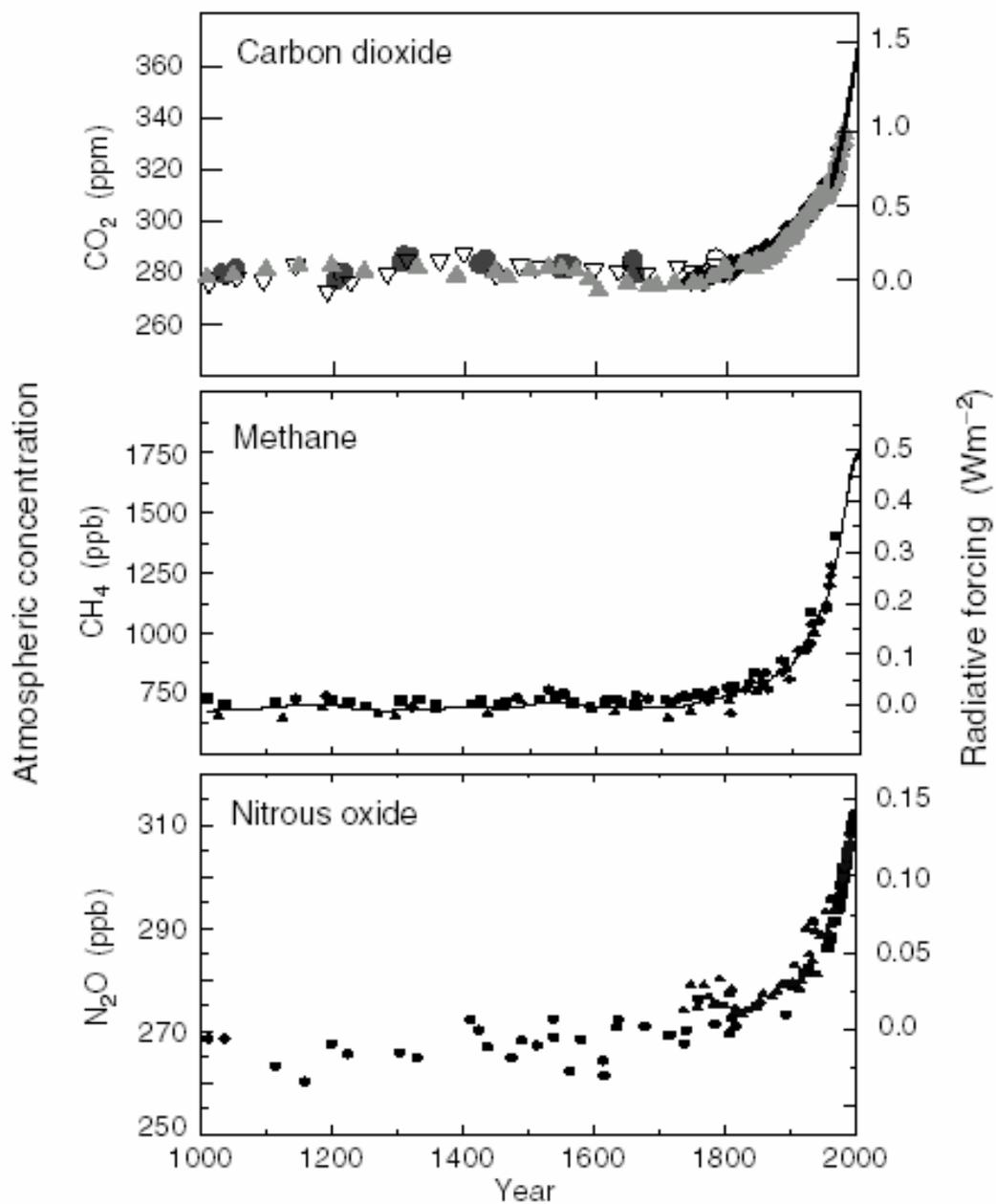


Figura 18. Aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O.  
 Fonte: IPCC, 2001.

Além disso, estudos relacionam o aquecimento global à elevação do nível do mar (Figura 19) devido ao degelo das calotas polares, além de acarretar em diversas alterações no sistema climático global, como no regime dos ventos, na pluviosidade e na circulação de oceanos.

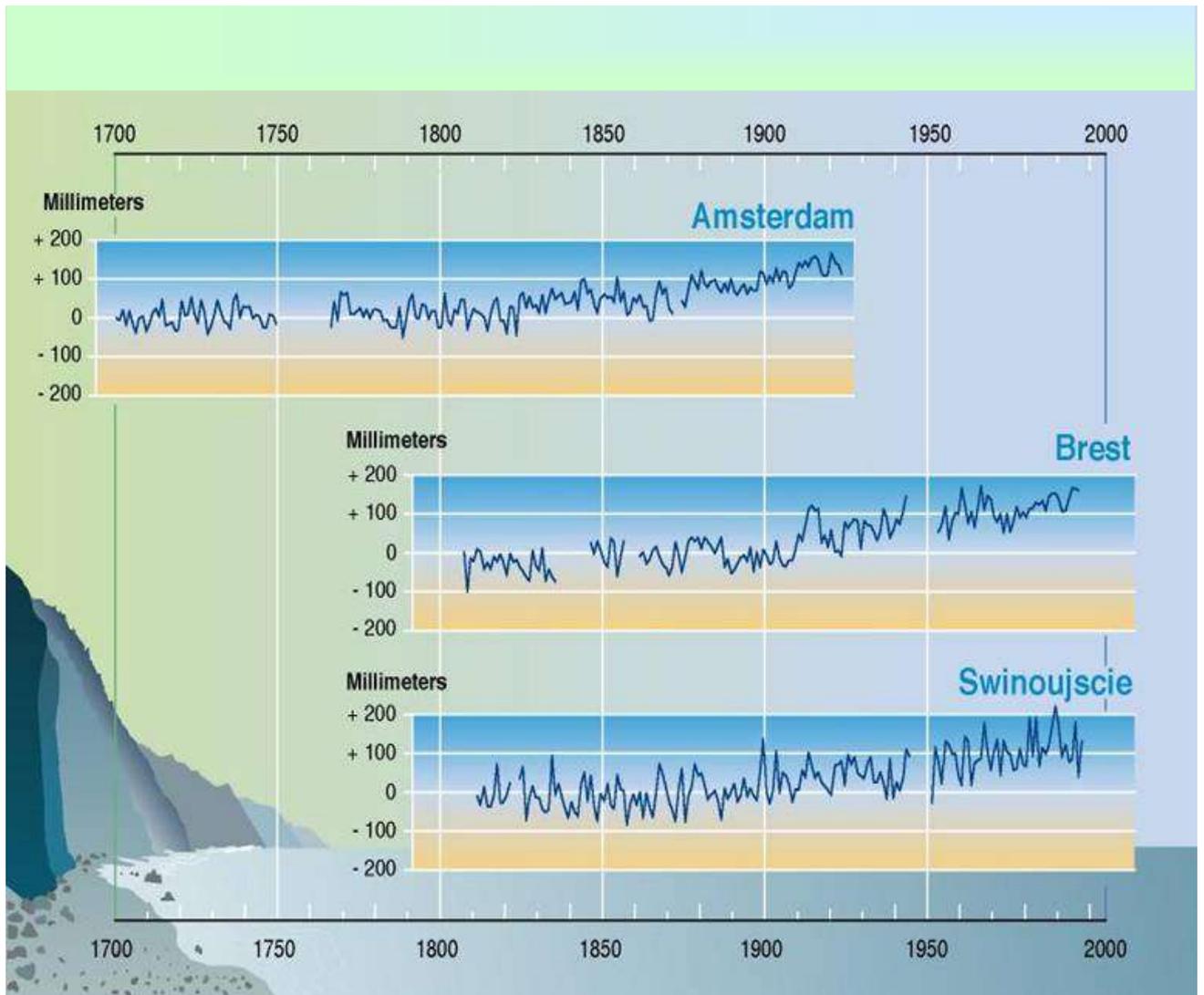


Figura 19. Aumento no nível do mar nos últimos 300 anos.  
 Fonte: IPCC, 2001.

### 5.2.1. Aquecimento Global e o Protocolo de Kyoto

Particularmente em relação ao aquecimento global, em 1998, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) constituíram o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), para apoiar com trabalhos científicos as negociações na Convenção-Quadro sobre o tema, no âmbito da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente (ECO-92).

Assim, em junho de 1992, 175 países e a União Européia negociaram e assinaram a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, na ECO-92, no Rio de Janeiro. Ao tornarem-se Partes da Convenção, estes países, desenvolvidos e em desenvolvimento, se propuseram a elaborar uma estratégia global “para proteger o sistema climático para gerações presentes e futuras”.

O órgão supremo da Convenção é a Conferência das Partes (CoP). A CoP é composta de todos os países que ratificam a Convenção e, portanto, segundo as normas internacionais, comprometem-se legalmente com o seu cumprimento. Podem participar, como observadores, representante de países não signatários, agências da ONU e de organizações governamentais e não governamentais que estejam qualificadas com os assuntos cobertos pela Convenção (FIESP/CIESP, 2001).

Em 1997, durante a Conferência de Kyoto (CoP-3), no Japão, foi estabelecido um Protocolo no qual parte dos países membros da Convenção (39 países industrializados, listados no Anexo I do Protocolo) se comprometem a reduzir ou limitar as emissões futuras dos gases efeito estufa.

Através do Protocolo de Kyoto, foram criados três instrumentos econômicos de flexibilidade para apoiar a redução das emissões dos gases efeito estufa, que são:

1. Comércio de Emissões (*Emissions Trade*), restrito a empresas de países desenvolvidos (Anexo I do Protocolo), no qual são permitidas a compra e a venda do direito de emissão de gases efeito estufa;
2. Implementação Conjunta (*Joint Implementation - JI*), que estabelece que os países constatem no Anexo I do Protocolo conduzam, entre si, projetos para redução da emissão;
3. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) ou Clean Development Mechanism (CDM), que permite a países não listados no Anexo I do Protocolo, que é o caso do Brasil, a comercialização de créditos relativos à emissão de gases a países emissores que não atingirem as metas de redução consentidas entre as partes.

O MDL tem o objetivo de buscar a redução de emissões de gases efeito estufa em países em desenvolvimento, através de projetos de países desenvolvidos em desenvolvimento, na forma de sumidouros, investimentos em tecnologias mais limpas, eficiência energética e fontes alternativas de energia. Nesse mecanismo, são essenciais as reduções certificadas de emissões

(CER) que confirmem a redução das emissões e que representem adicionalidade à que ocorreria na ausência da atividade certificada de projeto.

Com a ratificação do Protocolo, entre 2008 e 2012, os signatários, listados no Anexo I do Protocolo de Kyoto, comprometem-se em reduzir suas emissões em 5,2%, na média, em relação aos níveis de 1990 (FIESP/CIESP, 2001).

### **5.2.1.1 Créditos de Carbono**

Os combustíveis fósseis, como por exemplo, o carvão mineral e os derivados de petróleo, são resultado do acúmulo de biomassa que em escalas geológicas de tempo se depositaram no subsolo. A extração dessas reservas e sua utilização como combustível energético através da combustão, liberam carbono armazenado no subsolo para a atmosfera em um período de tempo que é milhões de vezes menor que o tempo que o carbono atmosférico leva para se transformar em petróleo ou carvão mineral. A diferença entre as escalas de tempo de uso e acúmulo do carbono é um dos fatores que promove o desequilíbrio do ciclo do carbono, provocando o acúmulo de carbono na atmosfera em estado gasoso.

Uma maneira de controlar as emissões de carbono é utilizar a energia de maneira mais eficiente, diminuindo assim a necessidade de aumento no consumo energético. Outra maneira é substituir os recursos energéticos derivados de combustíveis fósseis por outros com menores emissões de carbono por kWh consumido, como é o caso das fontes renováveis (eólica, solar, biomassa, etc.).

Os projetos de mitigação do efeito estufa (principal impacto global causado pelo acúmulo de CO<sub>2</sub> e outros gases estufa na atmosfera), ao redor do mundo têm dado ênfase às alternativas citadas. Isso deve-se, principalmente, ao fato de que a matriz energética dos países desenvolvidos, principalmente dos EUA, é baseada em combustíveis fósseis com a utilização em larga escala de carvão mineral. Isto implica na produção de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> e outros gases estufa.

No caso do Brasil, a geração hidrelétrica ocupa parte importante na produção de energia elétrica, o que reduz o potencial de mitigação através da substituição de fontes fósseis por renováveis. Em média, a emissão pelo sistema elétrico interligado é de 0,02 tC/MWh, bastante baixa quando comparada, por exemplo, com o carvão mineral 0,36 tC/MWh (CENBIO, 2000a).

Mesmo quando neste cenário são introduzidas as futuras instalações de termelétricas no país, o quadro pouco se altera em relação às emissões de CO<sub>2</sub>, já que o combustível a ser utilizado, o gás natural, apresenta baixas emissões de CO<sub>2</sub>, comparado ao carvão mineral, 0,11 tC/MWh quando é queimado.

Foi aprovado, pelo painel de metodologias, órgão do “*executive board*” do Protocolo de Kyoto, a metodologia para geração de energia elétrica a partir de bagaço de cana e fornecimento para a rede de distribuição de energia elétrica como um projeto de MDL. Neste projeto é utilizado o conceito de margem combinada para determinar a intensidade de carbono teórica na expansão do setor elétrico nacional. Utilizando este conceito, o valor de referência para a intensidade de carbono do setor elétrico ficou estabelecido em 0,140 tC/MWh, ou 0,5 tCO<sub>2</sub> eq/MWh. Este valor contribui para melhorar a eficiência dos projetos de MDL baseados em emissões evitadas, pois aumenta quantidade de carbono evitada por MWh gerado.

O Brasil deve se beneficiar deste cenário como nação do Grupo dos Não-Anexo I pois pode se qualificar para vender créditos de carbono e também, como candidato a investimentos em projetos engajados com a redução da emissão de gases de efeito estufa. Segundo estimativas do Banco Mundial, o país poderá ter uma participação de 10% no mercado de MDL, equivalente a US\$ 1,3 bilhões em 2007 (MDL e Biogás, 2006)

#### 5.2.1.1.1 Cálculo dos Créditos de Carbono

Para que sejam efetuados os cálculos de créditos de carbono, pode-se considerar:

- Potência instalada de uma planta de geração de energia a partir de biogás: 1.5 MW;
- Tempo de operação da planta: 8760 horas/ano;
- Energia total gerada:

$$\text{Potência} \cdot \text{instalada} \cdot \text{da} \cdot \text{planta} \times \text{tempo} \cdot \text{de} \cdot \text{operação} \cdot \text{da} \cdot \text{planta} \quad (22)$$

$$\text{Energia} \cdot \text{total} \cdot \text{gerada} = 1.5 \times 8760 = 13.140 \text{ MWh/ano}$$

- Fator de intensidade de carbono: 0,5 tCO<sub>2</sub> eq/MWh
- Total de CO<sub>2</sub> eq. evitado:

$$\text{Energia} \cdot \text{total} \cdot \text{gerada} \times \text{Fator} \cdot \text{de} \cdot \text{intensidade} \cdot \text{de} \cdot \text{carbono} \quad (23)$$

$$\text{Total} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{eq.} \cdot \text{evitado} = 13.140 \times 0,5 = 6.570 \text{ tCO}_2 \text{ eq./ano}$$

- Valor de Certificado de Emissões Evitadas (CEE): US\$ 10,00/tCO<sub>2</sub> eq.;
- Total de US\$ em certificados:

$$\text{Total} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{eq.} \cdot \text{evitado} \times \text{Valor} \cdot \text{de} \cdot \text{CEE} \quad (24)$$

$$\text{Total} \cdot \text{de} \cdot \text{US\$} \cdot \text{em} \cdot \text{certificados} = 6.570 \times 10 = 65.700 \text{ US\$/ano}$$

- Vida útil da planta: 10 anos;
- Total de US\$ durante a vida útil da planta:

$$\text{Total} \cdot \text{de} \cdot \text{US\$} \cdot \text{em} \cdot \text{certificados} \times \text{Vida} \cdot \text{útil} \cdot \text{da} \cdot \text{planta} \quad (25)$$

$$\text{Total} \cdot \text{de} \cdot \text{US\$} \cdot \text{durante} \cdot \text{a} \cdot \text{vida} \cdot \text{útil} \cdot \text{da} \cdot \text{planta} = 65.700 \times 10 = 657.000,00 \text{ US\$}$$

Para que se possa viabilizar o projeto de emissões evitadas de carbono, é necessária a elaboração de um documento dentro dos padrões exigidos pelo “*executive board*” do MDL. Este documento é chamado de PDD (*Project Design Document*). Além do PDD, onde todo o processo e o método de monitoramento das emissões evitadas são descritos, outros custos estão envolvidos no processo. Esses custos são chamados de custos transacionais.

### 5.3 Aspectos Ambientais da Utilização do Biogás como Fonte de Energia

Ao queimar combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) nas centrais elétricas e nos meios de transportes para produzir energia, são geradas grandes quantidades de gases como o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), que associadas às gotículas de água nas nuvens, voltam à Terra sob a forma de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>S) e ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) – chuvas ácidas. Estas afetam não só a natureza (fauna e flora) como também os edifícios e monumentos.

Nas zonas urbanas e industriais, a concentração destes tipos de gases atinge, freqüentemente, valores muito elevados, sendo que o setor de produção de energia é o maior colaborador para o seu aumento (PRONACI, 2002).

Habitualmente considera-se que o controle da poluição atmosférica implica na utilização de equipamentos de remoção de poluentes, no entanto, existe um conjunto de outras medidas, como o pré-tratamento ou a substituição de matérias-primas e combustíveis e a adoção de tecnologias menos poluentes, com ganhos significativos para a qualidade do ar.

A produção de energia de maneira renovável – as fontes renováveis de energia – é também uma medida interessante sob o ponto de vista ambiental no que se refere a poluição global, uma vez que permitem a obtenção de energia sem recorrer à queima de combustíveis fósseis e a conseqüente emissão de resíduos poluentes na atmosfera.

Em termos ambientais a utilização do biogás representa uma melhoria global no rendimento do processo. Em geral, o biogás é um resíduo do processo de tratamento de efluentes. Os benefícios atribuídos ao uso do biogás estão vinculados ao tipo de aproveitamento a que ele será destinado. As duas principais alternativas para o aproveitamento energético do biogás são: conversão em energia elétrica e o aproveitamento térmico.

A emissão de biogás para a atmosfera provoca impactos negativos ao meio ambiente e para a sociedade, na medida em que contribui para o agravamento do efeito estufa através da emissão de metano para a atmosfera. Além disso, provoca odores desagradáveis pela emissão de gases fétidos e tóxicos, devido a concentração de compostos de enxofre presentes no gás além de uma pequena, mas não desprezível, presença de bactérias responsáveis pela digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos.

O metano é um gás combustível produzido basicamente por fontes antropogênicas e naturais. Dentre as fontes antropogênicas, as principais em quantidades de biogás emitido são as plantações de arroz, a fermentação entérica, a queima de biomassa, o manejo de resíduos e o uso de combustíveis fósseis.

O manejo de resíduos inclui como fontes principais de emissão de metano o tratamento de efluentes e a disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários. Como fontes naturais pode-se citar os pântanos, oceanos e águas doces. A Figura 20 apresenta as principais fontes antropogênicas de metano e suas contribuições.

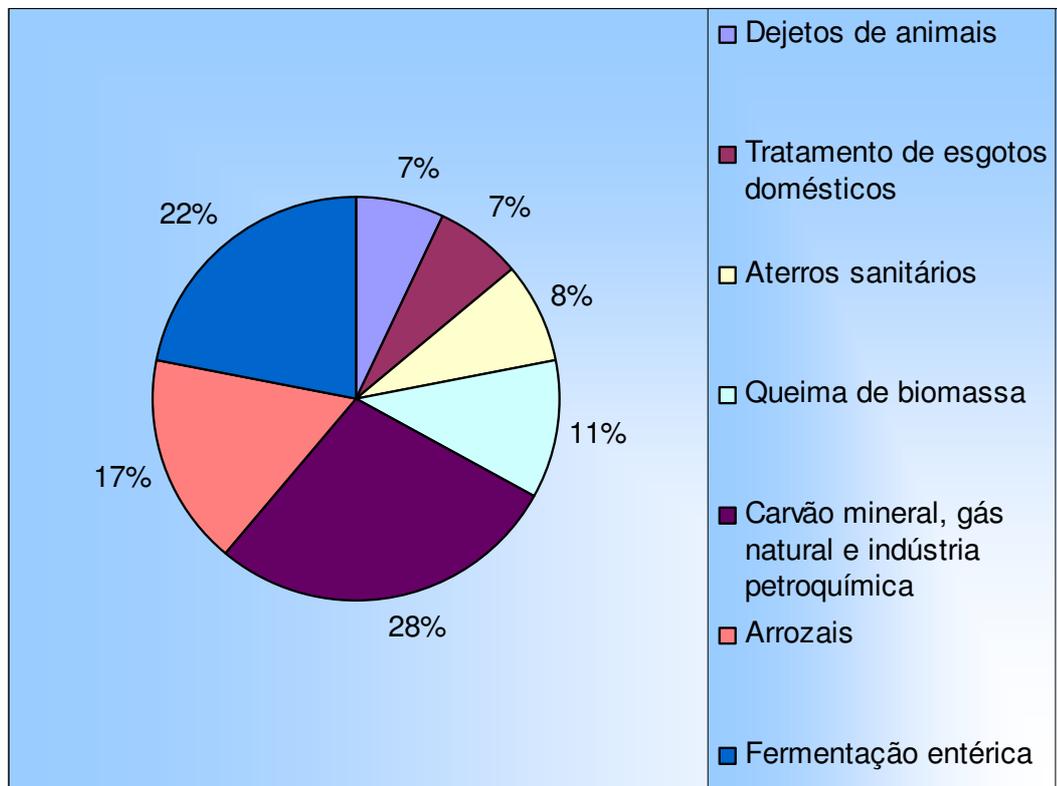


Figura 20. Principais fontes antropogênicas de metano e suas contribuições.  
 Fonte: ALVES & VIEIRA, 1998.

A Figura 21 mostra que a maior parte do aquecimento global foi decorrência de emissões antropogênicas.

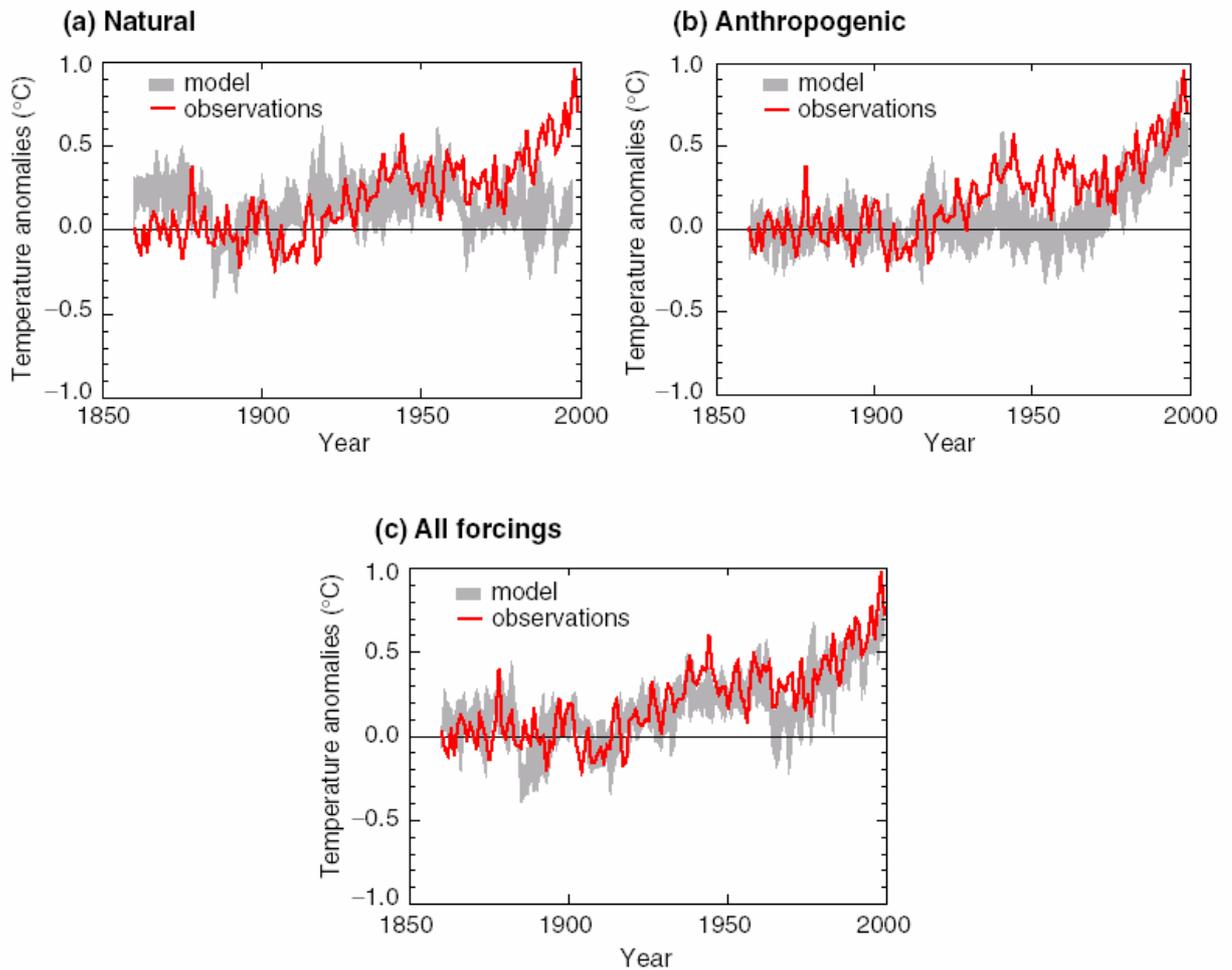


Figura 21. Simulação anual global do aumento da temperatura.  
 Fonte: IPCC, 2001.

A remoção de metano na troposfera, camada da atmosfera mais próxima da superfície da Terra ocorre por três processos. O principal deles tem início com a oxidação do metano por radicais hidroxila (-OH), ocorrendo eventualmente transformação em monóxido e dióxido de carbono. A concentração de NO<sub>x</sub> influencia fortemente os passos da reação.

Outras formas de remoção do metano da troposfera ocorre por captura dos solos e das águas (oxidação por microorganismos) e pelo transporte para a estratosfera, segunda camada da atmosfera, onde este gás é uma fonte importante de vapor d'água (LEXMOND & ZEEMAN, 1995).

A redução do metano emitido para a atmosfera pode ser conseguida pela sua captura, seguido da queima. Isto pode ser feito pela sua simples combustão com o objetivo de prevenir sua

emissão. Pode-se também recuperar o metano como fonte de energia evitando-se assim a queima de quantidade equivalente de combustível fóssil. Em ambos os casos o dióxido de carbono é formado.

Quando convertido em energia elétrica, as vantagens da utilização do biogás estão relacionadas às emissões evitadas pela geração de energia elétrica utilizando uma fonte renovável e à eficiência dos sistemas de conversão. Assim, deve-se analisar as emissões das principais tecnologias de conversão energética do biogás: motores ciclo Otto e turbinas a gás, conforme Tabela 15.

Tabela 15. Comparação das emissões entre as tecnologias de conversão.

<b>Tecnologia de Conversão</b>	<b>Potência Instalada</b>	<b>Rendimento Elétrico</b>	<b>Emissões de NOx (ppm)*</b>
Motores a Gás (Ciclo Otto)	30 kW – 20 MW	30% - 40%	250 – 3000
Turbinas a Gás (Médio Porte)	500 kW – 150 MW	20% - 30%	35 – 50
Microturbinas (Pequeno Porte)	30 kW – 100 kW	24% - 28%	< 9

\*ppm: parte por milhão.

Fonte: CENBIO, 2004f.

Observa-se na tabela acima que a principal diferença em termos de emissões atmosféricas entre as duas tecnologias está relacionada ao NOx, cujo principal impacto é a formação do ozônio troposférico.

#### **5.4 Aspectos da Poluição Atmosférica e suas Interações com a Saúde**

Apesar do potencial de energia melhorar a qualidade de vida humana ser inquestionável, a produção de energia convencional e o seu consumo estão intimamente relacionados com a degradação do meio ambiente. Esta degradação ameaça a saúde humana e a qualidade de vida, além de afetar o equilíbrio ecológico e a diversidade biológica.

Nos últimos 100 anos, em que a população do mundo pelo menos triplicou, os danos ambientais passaram de alterações locais para alterações globais. O aumento no uso de combustíveis fósseis resultou na emergência da ação do homem como uma força geoquímica e ecológica global; em outras palavras, o impacto acelerado da vida na Terra está afetando o mundo como um todo (SIRKIS et. al., 2003).

Literaturas especializadas em efeitos relacionados à saúde indicam que os principais efeitos da poluição atmosférica local à saúde humana são: problemas oftálmicos, doenças dermatológicas, gastrointestinais, cardiovasculares e pulmonares, além de alguns tipos de câncer. Efeitos sobre o sistema nervoso também podem ocorrer após exposição a altos níveis de monóxido de carbono no ar. A exposição humana pode se dar por inalação, ingestão ou contato com a pele, mas a inalação pode ser considerada a via mais importante e mais vulnerável (PHILIPPI, 2004).

A poluição do ar é caracterizada pela OMS como um fator de risco para várias doenças, como infecções respiratórias agudas, doenças pulmonares obstrutivas crônicas, asma e infecções respiratórias das vias aéreas superiores (garganta, nasofaringe, sinus, laringe, traquéia e brônquios) (PHILIPPI, 2004).

Estudos nacionais têm verificado associações positivas entre poluição do ar e doenças respiratórias e mesmo aumento da mortalidade. Os efeitos são sentidos principalmente por crianças e idosos (PHILIPPI, 2004).

Um levantamento realizado em quatro municípios do interior paulista – Atibaia, Campinas, Ribeirão Preto e São José dos Campos – mostrou que Ribeirão Preto apresentava índices menores de doenças respiratórias crônicas entre 1990 e 1992, de acordo com uma amostra de 5% dos prontuários de pacientes de cinco postos de saúde do município. A frequência relativa de doenças respiratórias crônicas no total dos postos pesquisados foi de 1,58% (Ribeirão Preto), 1,80% (Atibaia), 4,27% (São José dos Campos) e 6,31% (Campinas). Os municípios com perfil mais industrial, como Campinas e São José dos Campos, apresentaram percentuais maiores. Apresentou-se uma tendência ao aumento de consultas em razão de doenças respiratórias nos períodos mais frios do ano (PHILIPPI, 2004).

### 5.4.1 Principais Fontes Poluidoras e seus Efeitos à Saúde

Segundo Philippi et. al. (2004), as principais fontes poluidoras e seu efeitos à saúde são:

- Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono é um gás incolor, inodoro e insípido. Provém da combustão incompleta de qualquer combustível de origem orgânica (biomassa, combustíveis fósseis, etc.). Sua primeira ação no organismo humano é a redução da habilidade do sistema circulatório transportar oxigênio, por causa de sua maior afinidade com a hemoglobina do que com o oxigênio – 200 a 250 vezes maior – formando a carboxihemoglobina (COHb) em vez da oxihemoglobina, que leva o oxigênio para os tecidos. Altos níveis de monóxido de carbono estão associados a prejuízo nos reflexos, na capacidade de estimar intervalos de tempo, no aprendizado, no trabalho e na capacidade visual.

A Tabela 16 mostra os níveis de carboxihemoglobina e os efeitos relacionados à saúde.

Tabela 16. Níveis de carboxihemoglobina e efeitos relacionados à saúde.

% de COHb no sangue em relação à quantidade total de Hb	Efeitos associados a este nível de COHb
80	Morte
60	Perda de consciência; morte em caso de exposição contínua
40	Confusão; colapso em exercícios
30	Dor de cabeça, cansaço, julgamento prejudicado
7 – 20	Decréscimo significativo do consumo máximo de oxigênio durante exercícios enérgicos em homens jovens
5 – 17	Diminuição significativa da percepção visual, da destreza manual, da facilidade de aprender e do rendimento em tarefas que exijam certas habilidades
5 – 5,5	Decréscimo significativo do consumo máximo de oxigênio e da duração de exercícios enérgicos em homens jovens
Abaixo de 5	Decréscimo insignificante na capacidade de concentração
2,9 – 4,5	Diminuição significativa da capacidade de fazer exercícios em pessoas que já tenham problemas no coração

Fonte: EPA, 1994.

- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

O dióxido de carbono provém de metabolismo humano e combustão. Controla as taxas de respiração em uma pessoa e, conforme seu nível de concentração aumenta, a pessoa sente como se não houvesse ar suficiente no ambiente. A taxa respiratória aumenta no sentido de compensar essa falta de ar.

- Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>)

O dióxido de nitrogênio faz parte da família dos óxidos de nitrogênio presentes na atmosfera (NO, NO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O), da qual o óxido nítrico (NO) é o de maior emissão e em geral transforma-se em dióxido de nitrogênio. É um gás marrom-avermelhado e muito irritante. A produção provem direta ou indiretamente da oxidação de óxido nítrico na atmosfera, de processo de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam carvão, óleo, gás, biomassa e incineração de resíduos. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos, que contribuem para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera, e compostos orgânicos tóxicos. Esse gás aumenta a sensibilidade dos indivíduos que sofrem de asma ou bronquite e diminui a resistência às infecções respiratórias.

Os óxidos de nitrogênio podem tanto provocar efeitos diretos como serem precursores da poluição fotoquímica (ozônio). Além disso, os óxidos de nitrogênio contribuem de forma importante para a formação de chuvas ácidas, assim como o dióxido de enxofre. Estudos indicam que asmáticos e pessoas que sofrem de doenças pulmonares obstrutivas crônicas são muito sensíveis aos impactos dos óxidos de nitrogênio sobre a função pulmonar.

- Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)

O dióxido de enxofre é um gás incolor, com odor pungente, que na atmosfera pode ser transformado em trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) e, na presença de vapor de água, passa rapidamente a ácido sulfúrico (composto – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Tem como principais fontes os processos de queima de carvão mineral e de óleo combustível, refinarias de petróleo, escapamentos de veículos a diesel e a gasolina e produção de celulose. É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis. Causam desconforto na respiração, doenças respiratórias e agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares já existentes. Pessoas com asma ou doenças crônicas de coração e pulmão são mais sensíveis a esse poluente.

- Ozônio (O<sub>3</sub>)

Gás incolor e inodoro é o principal componente da névoa fotoquímica nas concentrações ambientais. Não é emitido diretamente à atmosfera. A radiação solar o produz por processo fotoquímico sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis. Provoca irritação nos olhos e vias respiratórias e diminuição da capacidade pulmonar. Exposição a altas concentrações pode resultar em sensações de aperto no peito, tosse e chiado na respiração.

- Material Particulado

O material particulado compõe-se de partículas sólidas ou líquidas, que ficam suspensas no ar, emitidas na forma de poeira, fumaça, fumo e névoa. O material particulado em suspensão é caracterizado pelas partículas de diâmetro aerodinâmico menor que 100 µm e as partículas inaláveis são aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor que 10 µm; poeiras respiráveis são partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm. As partículas de pequeno diâmetro (< 2,5 µm) são prejudiciais à saúde, pois podem atingir os alvéolos pulmonares. Quanto menor o tamanho da partícula, mais profundamente ele pode atingir e se depositar no aparelho respiratório. As principais fontes de material particulado são os processos industriais, a queima de combustíveis fósseis, especialmente em veículos automotores com motor diesel, poeira de rua e a queima de biomassa e aerossol secundário, ou seja, partículas formadas na atmosfera. As fontes naturais são os polens, o aerossol marinho e a poeira do solo. Essas substâncias causam efeitos significativos em pessoas com doença pulmonar, como asma e bronquite. Os efeitos a longo prazo também incluem aumento da mortalidade e da morbidade respiratória.

- Hidrocarbonetos e outros Compostos Orgânicos

Os efeitos diretos à saúde provocados pelos hidrocarbonetos gasosos (HC) têm de ser considerados para cada tipo de hidrocarboneto ou composto orgânico, uma vez que se trata de um conjunto muito amplo, com grande variação de toxicidade. De forma indireta, os reativos

fotoquimicamente são importantes em função da participação do *smog* fotoquímico<sup>14</sup>, produzindo outros compostos agressivos à saúde, como o ozônio e os aldeídos.

Os efeitos diretos de alguns hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos voláteis em relação à saúde são preocupantes. O benzeno e os hidrocarbonetos aromáticos, por exemplo, provêm principalmente da emissão dos veículos, de refinarias de petróleo, de algumas indústrias químicas, da produção de tintas e de carvão. Os efeitos à saúde estão relacionados ao sistema formador do sangue, no caso do benzeno, e o surgimento de neoplasias.

### **5.5 Aspectos Sociais da Utilização do Biogás como Fonte de Energia**

O aproveitamento energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, também traz benefícios para a sociedade, pois promove a utilização ou reaproveitamento de recursos “descartáveis” e/ou de baixo custo; colabora com a não dependência da fonte de energia fóssil, oferecendo maior variedade de combustíveis; possibilita a geração descentralizada de energia; aumenta a oferta de energia; possibilita a geração local de empregos; reduz os odores e as toxinas do ar, diminui a emissão de poluentes pela substituição de combustíveis fósseis, colabora para a viabilidade econômica dos aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes, otimiza a utilização local de recursos e aumenta a viabilidade do saneamento básico no país, permitindo o desenvolvimento tecnológico de empresas de saneamento e energéticas.

---

<sup>14</sup> *Smog* fotoquímico é um fenômeno que se processa na atmosfera mediante reações entre os poluentes, sob a influência dos raios ultravioletas da luz solar, resultando na síntese de outros produtos que não foram lançados pelo homem.

(Fonte:

[http://72.14.207.104/search?q=cache:LW3PiSz\\_zFwJ:www.asma bronquica.com.br/medical/tipos\\_de asma asma urbana.html+%22smog+fotoku%C3%ADmico%22&hl=pt-BR&gl=br&ct=clnk&cd=2&lr=lang\\_pt](http://72.14.207.104/search?q=cache:LW3PiSz_zFwJ:www.asma bronquica.com.br/medical/tipos_de asma asma urbana.html+%22smog+fotoku%C3%ADmico%22&hl=pt-BR&gl=br&ct=clnk&cd=2&lr=lang_pt)

## **6. ESTUDO DE CASO: GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO DO CONJUNTO RESIDENCIAL DA USP – PROJETO PUREFA**

### **6.1 Objetivos do Projeto**

O projeto Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas (PUREFA) é um projeto da Universidade de São Paulo (USP), coordenado pela Escola Politécnica, financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), em um edital voltado à infra-estrutura (CT-INFRA), que teve três objetivos principais: implantar medidas de gestão e de ação de eficiência energética visando reduzir o consumo na Universidade; ampliar a geração distribuída na USP a partir de recursos renováveis e não convencionais de energia e implantar políticas de incentivo permanente ao uso eficiente e racional de energia.

O Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) / Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) desenvolveu duas metas deste projeto, relativas ao uso do biogás para geração de eletricidade.

A primeira, correspondente à meta 11, teve por objetivo implementar um sistema de captação, purificação e armazenamento do biogás, produzido por um reator UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, também conhecido como biodigestor RAFA – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com manto de lodo, localizado no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) da Universidade de São Paulo-USP. O esgoto tratado é proveniente do Conjunto Residencial da USP (CRUSP).

A segunda, correspondente à meta 12, refere-se à utilização do biogás, armazenado na meta anterior, como combustível em um sistema de geração de energia elétrica.

### **6.2 Sistema de Tratamento do Esgoto do CRUSP**

Para a implantação do sistema demonstrativo de geração de energia elétrica a partir do biogás, foi utilizado, para o tratamento do esgoto, um reator UASB com 6 metros de altura, 2,3 m de diâmetro e volume útil de 25 m<sup>3</sup>, já existente CTH, em pleno funcionamento e que é alimentado com esgoto sanitário gerado no CRUSP.

Atualmente o reator UASB é o sistema mais empregado para tratamento anaeróbio de esgoto. A principal característica deste reator é o decantador interno, dispositivo que divide o reator em duas partes. Uma parte inferior ou zona de digestão, onde existe um manto de lodo e uma parte superior ou zona de sedimentação, onde os flocos de lodo encontram uma zona tranqüila permitindo que estes depositem-se sobre a superfície inclinada do decantador, retornando à zona de digestão.

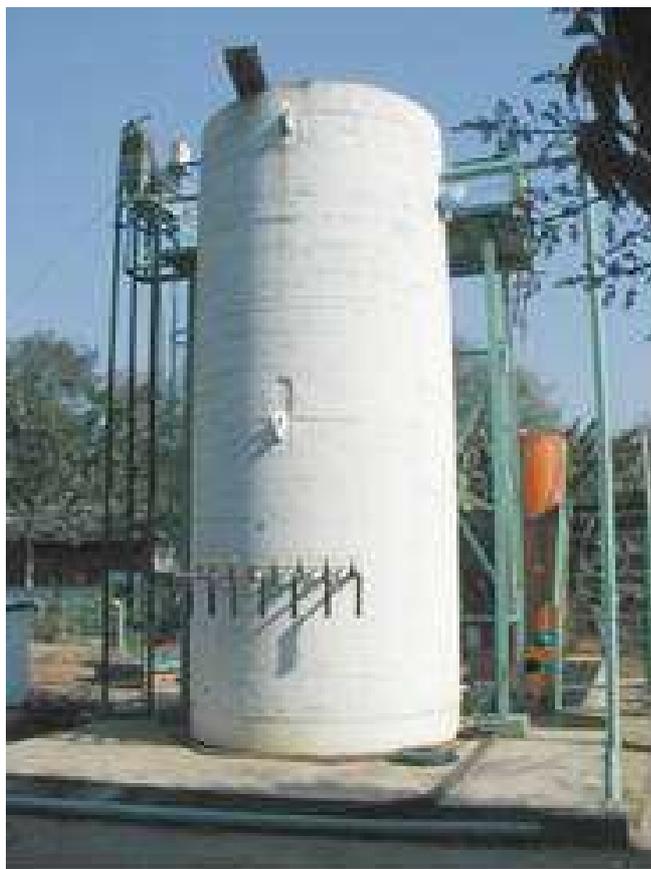


Figura 22. Biodigestor modelo UASB existente no CTH  
Fonte: CENBIO, 2003c.

Antes de ser tratado no biodigestor, o efluente passa por um sistema de pré-tratamento (Figura 23), composto por: caixa de areia (Figura 24), calha Parshall (Figura 25), tanque de acumulação (Figura 26) e bomba (Figura 27), que provoca seu deslocamento até o biodigestor.



Figura 23. Sistema de pré-tratamento do esgoto.  
Fonte: CENBIO, 2003c.



Figura 24. Caixa de areia.  
Fonte: CENBIO, 2003c.



Figura 25. Calha Parshall.  
Fonte: CENBIO, 2003c.

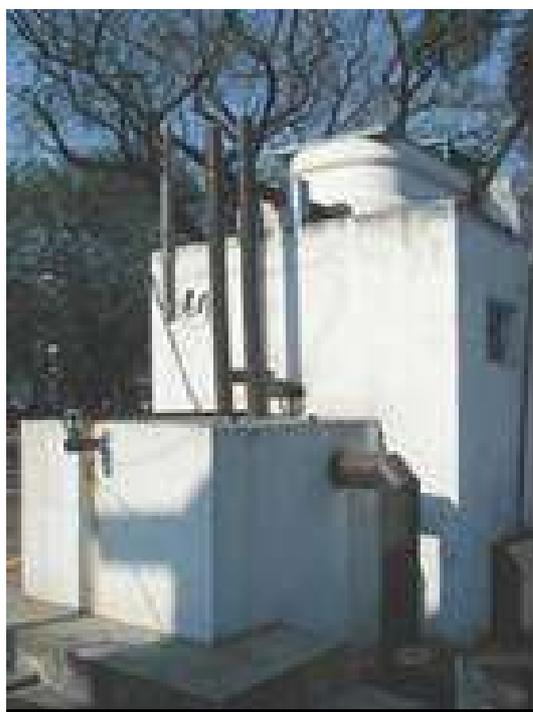


Figura 26. Tanque de acumulação do esgoto.  
Fonte: CENBIO, 2003c.



Figura 27. Bomba que leva o efluente para o biodigestor.  
Fonte: CENBIO, 2003c.

### **6.3 Metodologia Adotada para Execução do Projeto**

Para melhor contextualizar o desenvolvimento das metas do projeto, primeiramente foi elaborado um estudo sobre o estado da arte do biogás, que permitiu identificar perspectivas para sua aplicação.

#### **6.3.1 Primeiras Análises Físico-Químicas do Biogás**

Foram solicitadas à Distribuidora de Gás Natural de São Paulo (COMGÁS) duas análises para determinar a composição química do biogás, parâmetro essencial para estimativa do potencial de geração de eletricidade. O resultado da primeira análise apresenta-se na Tabela 17. A Figura 28 mostra o procedimento de coleta do biogás e o sistema de coleta composto por um amostrador tipo saco plástico apropriado para este tipo de coleta de amostra.



Figura 28. Fotos da coleta do biogás para análises realizadas pela COMGÁS.  
Fonte: CENBIO, 2004g.

Tabela 17. Resultado da primeira análise físico-química do biogás.

Compostos Químicos	% Vol da 1ª análise do biogás	% Vol do biogás em geral
H <sub>2</sub> (Hidrogênio)	0,000%	1 a 2%
O <sub>2</sub> (Oxigênio)	0,00236%	0.1 a 1%
N <sub>2</sub> (Nitrogênio)	15,08615%	0.5 a 2.5%
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	6,12158%	25 a 40%
CH <sub>4</sub> (Metano)	78,77848%	50 a 80%
nC <sub>4</sub> (n-butano)	0,00253%	-----
iC <sub>5</sub> (iso -pentano)	0,00015%	-----
nC <sub>5</sub> (n-pentano)	0,00025%	-----
C <sub>6</sub> + (hexano e superiores)	0,00020%	-----
H <sub>2</sub> S (Sulfeto de Hidrog.)	0,0083%	1 a 2%
<b>Soma</b>	<b>100,000%</b>	<b>100%</b>

Fonte: ALVIM, 2003.

Verificando o resultado da 1ª análise emitido pela COMGÁS e comparando-o com a composição geral do biogás, observou-se que houve problemas na amostra coletada, pois alguns valores encontram-se fora do padrão, como é o caso das concentrações de nitrogênio (N<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Além disso, também foi detectada a presença de hidrocarbonetos, que não fazem parte da composição do biogás, tais como n-butano, iso-pentano, n-pentano, hexano e superiores. Por esta razão, uma nova análise foi solicitada.

Porém, antes da realização da segunda análise, algumas modificações foram efetuadas no biodigestor. Visando garantir a desobstrução da passagem do biogás gerado, foi realizada uma limpeza no equipamento. Os vazamentos detectados foram eliminados através da instalação de uma peça, que além da vedação também proporcionou um alongamento na secção de captação do

biogás gerado (Figura 29). Esta medida confere maior segurança a todos os equipamentos do sistema de geração de eletricidade instalados, pois evita que a espuma, resíduo gerado no processo de biodigestão, seja transportada pela tubulação de gás, impedindo possíveis entupimentos.



Figura 29. Alongamento da secção de captação do biogás.  
Fonte: CENBIO, 2004g.

Após a implementação destas medidas foi realizada a segunda análise da composição do biogás, cujos resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18. Resultado da segunda análise físico-química do biogás.

Compostos Químicos	% Vol da 2ª análise do biogás	% Vol do biogás em geral
H <sub>2</sub> (Hidrogênio)	0,000%	1 a 2%
O <sub>2</sub> (Oxigênio)	0,068%	0.1 a 1%
N <sub>2</sub> (Nitrogênio)	44,988%	0.5 a 2.5%
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	3,308%	25 a 40%
CH <sub>4</sub> (Metano)	51,636%	50 a 80%
nC4 (n-butano)	0,000%	-----
iC5 (iso -pentano)	0,000%	-----
nC5 (n-pentano)	0,000%	-----
C6+ (hexano e superiores)	0,000%	-----
H <sub>2</sub> S (Sulfeto de Hidrog.)	0,000%	1 a 2%
<b>Soma</b>	<b>100,000%</b>	<b>100%</b>

Fonte: ALVIM, 2003.

Comparando novamente o resultado da segunda análise, emitido pela COMGÁS, com a composição geral do biogás, observou-se que, ainda assim, com a nova estrutura instalada na saída do biogás, houve problemas com a amostra coletada.

Por esta razão, o biodigestor passou por uma avaliação de operação, quando foi identificada uma possível razão da contaminação. Durante a passagem do efluente pelo segundo medidor de vazão, o contato com o ar provocava o arraste de nitrogênio, fazendo com que aumentasse a participação deste componente no biogás, conforme se verifica nas Tabelas 17 e 18. Para sanar este problema, tal medidor de vazão seria substituído por um hidrômetro.

### 6.3.2 Análise do Esgoto do CRUSP

Para se estimar a produção diária de biogás a partir dos valores da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), foi necessário determinar os parâmetros do efluente antes e após seu tratamento no biodigestor. Para tal, foram solicitadas à Ambiental Laboratório e Equipamentos Ltda. análises do efluente líquido, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19. Resultado da análise do efluente antes do seu tratamento no biodigestor.

Parâmetros	Expresso Como	Resultado
Alcalinidade Total (mg/L)	CaCO <sub>3</sub>	156
DBO (mg/L)	O <sub>2</sub>	329
DQO (mg/L)	O <sub>2</sub>	1,02 X 10 <sup>3</sup>
Gás Carbônico (mg/L)	CO <sub>2</sub>	> 100
pH a 25 °C (-)	-	6,15
Sólidos Totais (mg/L)	-	1,13 X 10 <sup>3</sup>
Sólidos Totais Fixos (mg/L)	-	460
Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	-	668
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	-	661
Sólidos Dissolvidos Fixos (mg/L)	-	400
Sólidos Dissolvidos Voláteis (mg/L)	-	261
Sulfeto (mg/L)	S	3,0

Fonte: ANGELO, 2003.

Tabela 20. Resultado da análise do efluente após seu tratamento no biodigestor.

Parâmetros	Expresso Como	Resultado
Alcalinidade Total (mg/L)	CaCO <sub>3</sub>	264
DBO (mg/L)	O <sub>2</sub>	59
DQO (mg/L)	O <sub>2</sub>	148
Gás Carbônico (mg/L)	CO <sub>2</sub>	65
pH a 25 °C (-)	-	6,84
Sólidos Totais (mg/L)	-	454
Sólidos Totais Fixos (mg/L)	-	336
Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	-	118
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	-	254
Sólidos Dissolvidos Fixos (mg/L)	-	239
Sólidos Dissolvidos Voláteis (mg/L)	-	15
Sulfeto (mg/L)	S	7,0

Fonte: ANGELO, 2003.

A partir dos dados obtidos nas análises, foi possível estimar a vazão diária de biogás. Como dados de entrada para esses cálculo tem-se:

- Volume do biodigestor: 25 m<sup>3</sup>;
- Vazão diária de esgoto: 3 m<sup>3</sup>/hora = 72 m<sup>3</sup>/dia;
- Tempo de Retenção Hidráulica: 8 horas;
- DBO: 329 mgO<sub>2</sub>/l = 0,329 kgO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>;
- Eficiência de remoção: 82%
- Carga orgânica

$$Vazão \cdot diária \cdot de \cdot esgoto \times DBO \quad (26)$$

$$Carga \cdot orgânica = 72 \times 0,329 = 23,688 \text{ kgDBO/dia}$$

- Geração de carga orgânica por pessoa por dia: 0,054 kg/DBO;

- Geração de biogás por pessoa por dia: 12 l;
- População equivalente do CRUSP:

$$\frac{\text{Carga} \cdot \text{orgânica}}{\text{Carga} \cdot \text{orgânica} \cdot \text{por} \cdot \text{pessoa} \cdot \text{por} \cdot \text{dia}} \quad (27)$$

$$\text{População} \cdot \text{equivalente} \cdot \text{do} \cdot \text{CRUSP} = \frac{23,688}{0,054} = 439 \text{ pessoas}$$

- Vazão diária de biogás estimada:

$$\text{População} \cdot \text{equivalente} \cdot \text{CRUSP} \times \text{Geração} \cdot \text{biogás} / \text{dia} / \text{pessoa} \times \text{eficiência} \cdot \text{de} \cdot \text{remoção} \quad (28)$$

$$\text{Vazão} \cdot \text{diária} \cdot \text{de} \cdot \text{biogás} \cdot \text{estimada} = 439 \times 12 = 5.268,00 \text{ l/dia} = 5,27 \text{ m}^3/\text{dia}$$

### 6.3.3 Dificuldades do Projeto

Houve grande dificuldade em encontrar equipamentos que atendessem às necessidades do biodigestor para o esquema de instalação primeiramente previsto (instalação dos tubos, pontos de coleta, válvulas solenóide de segurança, válvulas esfera, sensor medidor de vazão, secador, manômetro, medidor de vazão, termômetro e gasômetro – Figura 30 e Tabela 21). Como a pressão de operação é baixa os equipamentos ora não existiam, ora eram extremamente caros, por serem importados e específicos.

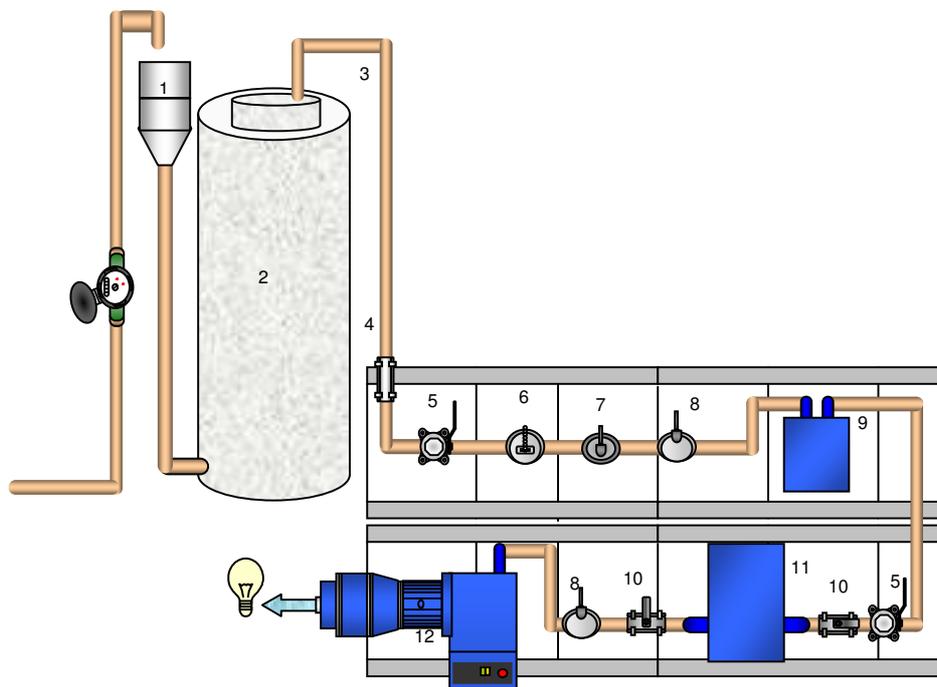


Figura 30. Primeiro fluxograma da instalação dos equipamentos.  
 Fonte: CENBIO, 2003c.

Tabela 21. Descrição dos equipamentos da instalação.

Equipamento	Número	Quantidade
Hidrômetro	1	1
Biodigestor	2	1
Tubulação	3	1
Válvula de segurança	4	1
Ponto de coleta do biogás	5	2
Sensor de temperatura	6	1
Medidor de pressão	7	1
Medidor de vazão	8	2
Purificador do biogás	9	1
Válvula esfera	10	2
Gasômetro	11	1
Grupo motor-gerador	12	1

Fonte: CENBIO, 2003c.

Tais dificuldades podem ser percebidas pela pressão requerida para operação de um secador comum, correspondente a 71 m.c.a. e pelo filtro especial para biogás, correspondente a 30 cm.c.a., não atendendo à pressão que foi estipulada segura para o biodigestor (8 cm.c.a.). Vale ressaltar que esses dados foram obtidos junto aos respectivos fabricantes.

Diante deste fato, a equipe executora do projeto desenvolveu um sistema de purificação do biogás e um medidor de pressão para controlar e monitorar a pressão do biodigestor e do gasômetro. Ambos os sistemas desenvolvidos estão descritos a seguir.

#### 6.3.4 Instalação da Tubulação

Em relação à tubulação, optou-se por tubos de ½” (meia polegada) de PVC, pois são mais fáceis de manusear, não interferem no processo e são mais baratos (Figura 31).



Figura 31. Fotos da tubulação de biogás instalada.  
Fonte: CENBIO, 2004g.

Em relação à válvula de alívio de pressão, denominada válvula de segurança, foi substituída por um selo hidráulico (Figura 32), pois ele garante que a pressão interna do sistema

não ultrapasse 8 cm.c.a. sem a necessidade de ser trocado ao entrar em operação e com um custo muito inferior à válvula de alívio de pressão, que possui uma membrana que se rompe cada vez que a pressão máxima é ultrapassada.



Figura 32. Selo hidráulico.  
Fonte: CENBIO, 2004g.

### **6.3.5 Sistema de Purificação do Biogás**

Foi desenvolvido um sistema de purificação composto por dois compartimentos e o mesmo instalado na linha de captação do gás. Antes do biogás ser alimentado neste sistema, passa por um recipiente onde fica retida a água condensada durante sua passagem pela tubulação. O primeiro compartimento é composto por dois tipos de peneira molecular, sendo que uma delas visa à retirada da umidade e a outra à retirada do ácido sulfídrico ( $H_2S$ ), e sílica gel azul, utilizada como indicador, pois quando saturada, possui coloração diferente. O segundo contém cavaco de ferro, visando assegurar a retirada de  $H_2S$ , que possivelmente não tenha reagido com o primeiro elemento (Figura 33).



Figura 33. Fotos do sistema de purificação do biogás.  
Fonte: CENBIO, 2004g.

Existem válvulas instaladas antes e depois do sistema de purificação, facilitando sua manutenção.

#### **6.3.5.1 Análises Físico-Químicas do Biogás Antes e Após o Sistema de Purificação**

As primeiras análises físico-químicas do biogás foram realizadas pela COMGAS e os resultados foram apresentados anteriormente. Levando-se em consideração que as análises realizadas pela COMGAS apresentaram resultados fora do padrão esperado, foram contratados os serviços de análises da White Martins, que apresentou confiabilidade em todos os resultados obtidos no projeto FINEP/ENERG-BIOG, nº 23.01.0653.00, também executado pelo CENBIO e apresentado no Capítulo 4.

As análises foram realizadas antes e após o sistema de purificação do gás e os resultados apresentam-se nas Tabelas 22 e 23.

Tabela 22. Análise físico-química do biogás antes do sistema de purificação.

<b>Compostos Químicos</b>	<b>% Vol ou ppm</b>
O <sub>2</sub> (Oxigênio)	1,23%
N <sub>2</sub> (Nitrogênio)	15,5%
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	4,75%
CH <sub>4</sub> (Metano)	75,8%
H <sub>2</sub> S (Sulfeto de Hidrogênio)	649 ppm
H <sub>2</sub> O (água)	2,62%

Fonte: YAMASHITA, 2004.

Tabela 23. Análise físico-química do biogás após o sistema de purificação.

<b>Compostos Químicos</b>	<b>% Vol ou ppm</b>
O <sub>2</sub> (Oxigênio)	0,89%
N <sub>2</sub> (Nitrogênio)	13,2%
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	4,07%
CH <sub>4</sub> (Metano)	80,8%
H <sub>2</sub> S (Sulfeto de Hidrogênio)	< 1,0 ppm
H <sub>2</sub> O (água)	0,98%

Fonte: YAMASHITA, 2004.

Tendo em vista os novos resultados das análises, não houve necessidade de substituição do medidor de vazão do esgoto pelo hidrômetro, conforme previsto anteriormente.

O sistema de purificação está instalado na linha de captação do biogás e mostrou-se eficiente quanto à retirada de umidade e H<sub>2</sub>S.

### **6.3.6 Pré-Instalação do Medidor de Vazão de Biogás**

No final da tubulação foi instalado um conjunto medidor-totalizador de vazão, com a finalidade de registrar a vazão média de produção do biogás. Este conjunto foi dimensionado e

adquirido de acordo com os dados do projeto disponíveis e, para que o conjunto em questão ficasse protegido do tempo, foi construído um abrigo de madeira compensada (Figura 34).



Figura 34. Fotos da instalação do abrigo para o medidor de vazão de biogás.  
Fonte: CENBIO, 2004 g.

Para evitar danos ao equipamento, que é delicado, foram colocados um estabilizador e um fusível, garantindo sua segurança.

O totalizador (Figura 35) estava previsto para ser instalado no abrigo em alvenaria, porém, em um primeiro momento, foi instalado na linha de captação do biogás, na parte superior do biodigestor.

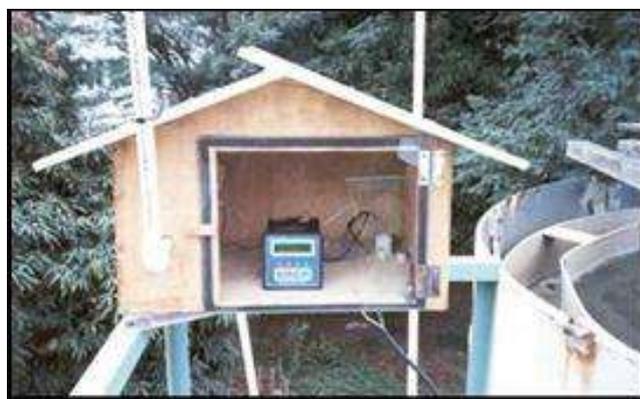


Figura 35. Totalizador da vazão de biogás instalado no abrigo de madeira.  
Fonte: CENBIO, 2004g.

O medidor de vazão volumétrico, do tipo turbina, instalado após o sistema de purificação, possui uma faixa de operação cujo valor mínimo é de 2 L/min e máximo de 10 L/min.

Foi identificada uma grande variação da vazão de biogás. Algumas vezes, o totalizador indicou vazão de 22 L/min (final da escala do *hardware*). Assim como indicou valores superiores a 10 L/min, indicou valores inferiores a 2 L/min, muitas vezes chegando a zero. Essas vazões não

podem ser consideradas como verdadeiras, pois estão fora da faixa de operação do equipamento. Segundo o fabricante, ao atingir esse valor, tanto o medidor quanto o totalizador de vazão não sofrem alterações, tais como funcionamento interrompido ou perda de calibração. Portanto, nessas condições, o totalizador continua operando normalmente, fazendo a somatória do volume total do biogás gerado que passa pelo equipamento.

Desconsiderando-se a medição da vazão pontual e a partir de um monitoramento diário, obteve-se vazão média de 4 m<sup>3</sup>/dia.

### **6.3.7 Monitoramento do Esgoto**

O horímetro (Figura 36), equipamento que contabiliza o número de horas que a bomba operou, encontra-se instalado na bomba de alimentação do biodigestor. A partir da análise da DBO do esgoto na entrada e na saída do biodigestor e dos dados do horímetro é possível fazer o cálculo teórico do volume de biogás gerado, cujos resultados apresentam-se na Tabela 24.



Figura 36. Horímetro.  
Fonte: CENBIO, 2005h.

Tabela 24. Cálculo teórico do volume de biogás gerado.

Data:	Q=vazão (Nm <sup>3</sup> /dia)			Carga orgânica (kg DBO/dia)				População equivalente(kg DBO/0,054Kg DBO.dia)	Produção Diária de Biogás (Nm <sup>3</sup> /dia)
	Q/dia	Qmed/h	Qmax/h	entrada	residual	removida			
13/dez/04	70,40	2,93	5,28	23,2	4,2	19,0	430	5,14	
14/dez/04	55,96	2,33	4,20	18,4	3,3	15,1	341	4,09	
15/dez/04	47,01	1,96	3,53	15,5	2,8	12,7	286	3,44	
16/dez/04	40,67	1,69	3,05	13,4	2,4	11,0	248	2,97	
17/dez/04	41,49	1,73	3,11	13,7	2,4	11,2	253	3,03	
20/dez/04	40,24	1,68	3,02	13,2	2,4	10,9	245	2,94	
21/dez/04	36,82	1,53	2,76	12,1	2,2	9,9	224	2,69	
22/dez/04	38,54	1,61	2,89	12,7	2,3	10,4	235	2,82	
23/dez/04	40,49	1,69	3,04	13,3	2,4	10,9	247	2,96	
4/jan/05	43,61	1,82	3,27	14,3	2,6	11,8	266	3,19	
5/jan/05	42,55	1,77	3,19	14,0	2,5	11,5	259	3,11	
6/jan/05	41,13	1,71	3,08	13,5	2,4	11,1	251	3,01	
7/jan/05	42,10	1,75	3,16	13,9	2,5	11,4	257	3,08	
10/jan/05	44,85	1,87	3,36	14,8	2,6	12,1	273	3,28	
11/jan/05	45,67	1,90	3,43	15,0	2,7	12,3	278	3,34	
12/jan/05	46,45	1,94	3,48	15,3	2,7	12,5	283	3,40	
13/jan/05	47,17	1,97	3,54	15,5	2,8	12,7	287	3,45	
14/jan/05	47,85	1,99	3,59	15,7	2,8	12,9	292	3,50	
17/jan/05	45,73	1,91	3,43	15,0	2,7	12,3	279	3,34	
18/jan/05	46,38	1,93	3,48	15,3	2,7	12,5	283	3,39	
19/jan/05	47,01	1,96	3,53	15,5	2,8	12,7	286	3,44	
20/jan/05	47,61	1,98	3,57	15,7	2,8	12,9	290	3,48	
21/jan/05	48,12	2,01	3,61	15,8	2,8	13,0	293	3,52	
26/jan/05	47,43	1,98	3,56	15,6	2,8	12,8	289	3,47	
27/jan/05	47,66	1,99	3,57	15,7	2,8	12,9	290	3,48	
28/jan/05	46,70	1,95	3,50	15,4	2,8	12,6	285	3,41	
31/jan/05	44,89	1,87	3,37	14,8	2,6	12,1	274	3,28	
1/fev/05	44,99	1,87	3,37	14,8	2,7	12,1	274	3,29	
2/fev/05	45,13	1,88	3,38	14,8	2,7	12,2	275	3,30	
3/fev/05	45,32	1,89	3,40	14,9	2,7	12,2	276	3,31	
4/fev/05	45,22	1,88	3,39	14,9	2,7	12,2	275	3,31	
10/fev/05	41,52	1,73	3,11	13,7	2,4	11,2	253	3,04	
11/fev/05	41,65	1,74	3,12	13,7	2,5	11,2	254	3,05	
14/fev/05	40,75	1,70	3,06	13,4	2,4	11,0	248	2,98	
15/fev/05	40,65	1,69	3,05	13,4	2,4	11,0	248	2,97	
16/fev/05	40,76	1,70	3,06	13,4	2,4	11,0	248	2,98	
17/fev/05	41,20	1,72	3,09	13,6	2,4	11,1	251	3,01	

Continuação da Tabela 24. Cálculo teórico do volume de biogás gerado.

Data:	Q=vazão (m <sup>3</sup> /dia)			Carga orgânica (kg DBO/dia)			População equivalente(kg DBO/0,054Kg DBO.dia)	Produção Diária de Biogás (m <sup>3</sup> /dia)
	Q/dia	Qmed/h	Qmax/h	entrada	residual	removida		
18/fev/05	41,64	1,73	3,12	13,7	2,5	11,2	254	3,04
21/fev/05	40,79	1,70	3,06	13,4	2,4	11,0	249	2,98
22/fev/05	41,19	1,72	3,09	13,6	2,4	11,1	251	3,01
23/fev/05	41,45	1,73	3,11	13,6	2,4	11,2	253	3,03
24/fev/05	41,79	1,74	3,13	13,7	2,5	11,3	255	3,06
28/fev/05	41,28	1,72	3,10	13,6	2,4	11,1	252	3,02
2/mar/05	41,77	1,74	3,13	13,7	2,5	11,3	255	3,05
11/mar/05	43,28	1,80	3,25	14,2	2,6	11,7	264	3,16
14/mar/05	43,64	1,82	3,27	14,4	2,6	11,8	266	3,19
15/mar/05	43,29	1,80	3,25	14,2	2,6	11,7	264	3,17
22/mar/05	43,61	1,82	3,27	14,4	2,6	11,8	266	3,19
3/mai/05	39,98	1,67	3,00	13,2	2,4	10,8	244	2,92
Instalação do Gasômetro - Hora – 17:00								
24/mai/05	40,15	1,67	3,01	13,2	2,4	10,8	245	2,94
Bomba foi para Manutenção - Voltou a operar 24/jul								
9/set/05	43,14	1,80	3,24	14,2	2,6	11,6	263	3,15

Fonte: CENBIO, 2005h.

Para a realização dos cálculos acima foram utilizados os valores apresentados na Tabela 25 a seguir.

Tabela 25. Valores utilizados para cálculos.

DBO entrada	329	mgO <sub>2</sub> /L
DBO saída	59,0	mgO <sub>2</sub> /L
Eficiência desejada (Global)	82%	
Geração de biogás	12	L/0,054 kg DBO.dia

Fonte: CENBIO, 2005h.

Sabendo-se que foi trocado o eixo da bomba do tipo parafuso e, por conseguinte, a bomba passa a ter menores números de paradas para manutenção, pode-se supor que a média da vazão de biogás sofrerá um aumento e deve se estabilizar por volta de 4 m<sup>3</sup>/dia, sendo que o máximo valor teórico é 5,27 m<sup>3</sup>/dia, calculado a partir das análises do efluente.

### 6.3.8 Alterações no Projeto

Em relação ao fluxograma inicialmente previsto, foram realizadas algumas modificações referentes aos equipamentos do sistema de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica. O fluxograma final é apresentado na Figura 37 e a identificação dos componentes encontra-se na Tabela 26.

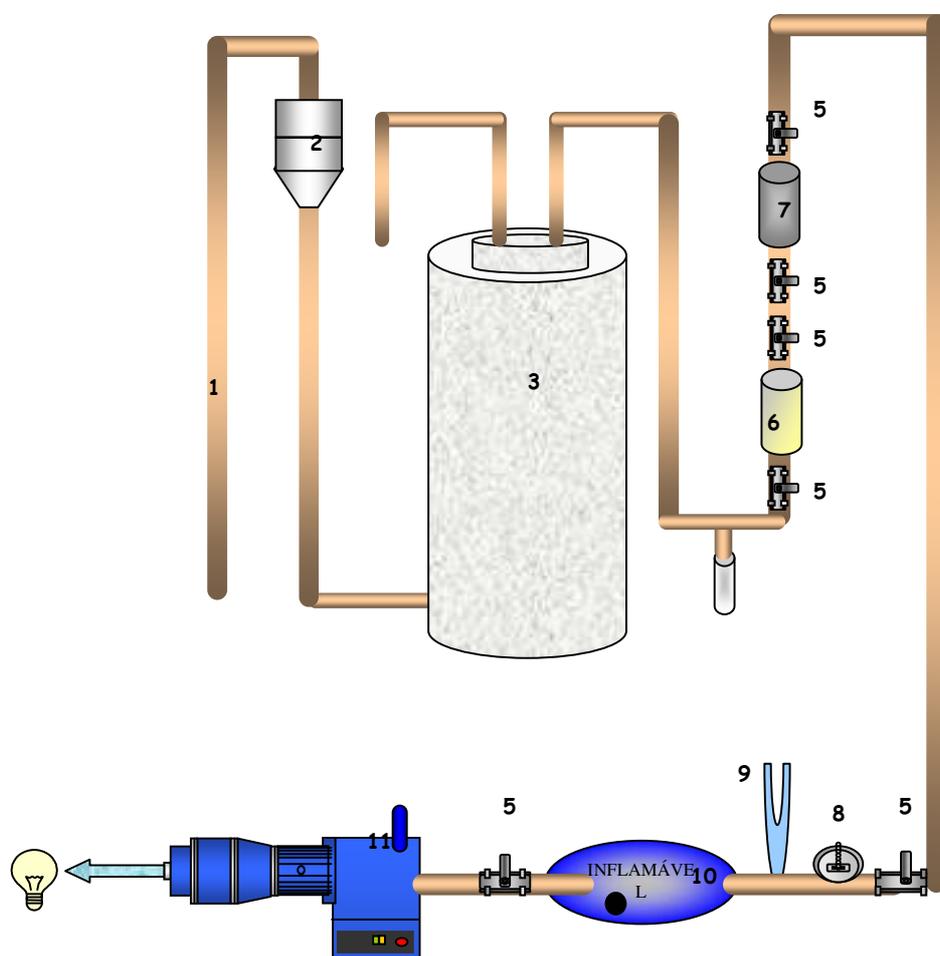


Figura 37. Fluxograma atual da instalação dos equipamentos.  
Fonte: CENBIO, 2004g.

Tabela 26. Descrição dos equipamentos da instalação.

<b>Equipamento</b>	<b>Número</b>	<b>Quantidade</b>
Tubulação	1	1
Medidor de Vazão de Esgoto	2	1
Biodigestor	3	1
Acumulador de Água do Biogás	4	1
Válvula de esfera	5	6
Primeiro Compartimento do Sistema de Purificação do Biogás (Retirada de Umidade e H <sub>2</sub> S)	6	1
Segundo Compartimento do Sistema de Purificação do Biogás (Retirada de H <sub>2</sub> S)	7	1
Medidor de Vazão de Biogás	8	1
Medidor de Pressão (Manômetro em U)	9	1
Gasômetro	10	1
Motor-Gerador	11	1

Fonte: CENBIO, 2004g.

Como citado anteriormente, a obtenção da vazão real do biogás possibilitou o dimensionamento do gasômetro e, conseqüentemente, o dimensionamento do grupo motor-gerador.

### **6.3.9 Construção do Abrigo para os Equipamentos**

Foi executada a construção em alvenaria para abrigo dos equipamentos (Figura 38), executada pela Famosa Engenharia e Construções.



Figura 38. Fotos da construção em alvenaria para abrigo dos equipamentos.  
Fonte: CENBIO, 2005h.

### 6.3.10 Monitoramento da Pressão

Após término da obra, foi desenvolvido e instalado, pela equipe do CENBIO, um medidor de pressão (manômetro em U – Figura 39), que garante o monitoramento da pressão do biodigestor e do gasômetro.

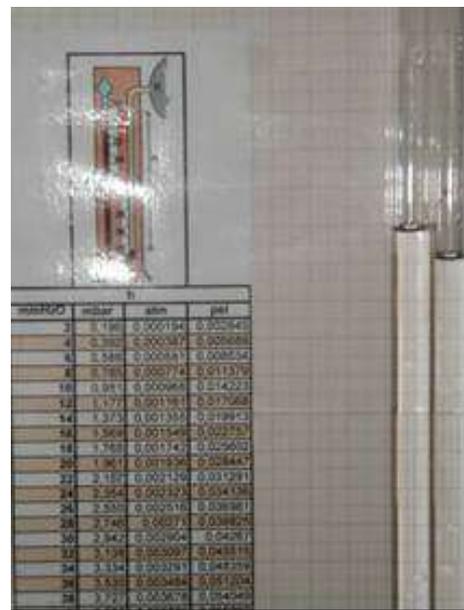


Figura 39. Fotos do medidor de pressão – manômetro em U.  
Fonte: CENBIO, 2005h.

### **6.3.11 Gasômetro: Armazenador de Biogás**

Foi adquirido um gasômetro com a finalidade de armazenar biogás suficiente para que o motor funcione cerca de duas horas, possibilitando um monitoramento das características do motor. O gasômetro descarta a idéia inicial de instalar um compressor, que exigiria uma outra série de equipamentos sofisticados, tais como secadores.

O gasômetro em questão é feito de PVC e possui duas camadas. A interna é preta e resistente o suficiente para conter o biogás. A externa é azul e protege a camada interior do meio ambiente.

O gasômetro tem um volume útil de  $10 \text{ m}^3$ , cujas dimensões são:

- Diâmetro do corpo: 2000 mm;
- Comprimento: 3200 mm.

### **6.3.12 Grupo Motor-Gerador**

A empresa que ofereceu o grupo motor-gerador de baixa potência, que melhor atendia às necessidades do projeto foi a Comercial Diesel Parts, que possuía um grupo motor-gerador de 18 kW, acompanhado de um quadro de comando e de um quadro de teste. Após realização de teste no grupo motor-gerador utilizando Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) como combustível e verificando o perfeito estado de funcionamento do equipamento, o mesmo foi adquirido. Apesar de possuir uma potência superior às das outras opções encontradas, foi a única possibilidade que se apresentou viável (Figura 40).



Figura 40. Grupo motor-gerador.  
Fonte: CENBIO, 2005h.

### 6.3.13 Instalação Final dos Equipamentos

O medidor-totalizador de vazão, que a princípio estava instalado após o sistema de purificação, foi transferido para o abrigo (Figura 41).



Figura 41. Fotos do medidor e totalizador de vazão de biogás instalados no abrigo.  
Fonte: CENBIO, 2005h.

Em seguida, foram instalados os demais equipamentos: gasômetro (Figura 42), grupo motor-gerador com painel de teste (Figura 43), painel de comando (Figura 44) e dado o “start up” do sistema, permitindo a realização dos testes de desempenho dos equipamentos, tempo de operação, energia gerada e análise dos gases de exaustão do grupo gerador.



Figura 42. Fotos do gasômetro: armazenador de biogás.  
Fonte: CENBIO, 2005h.

Na secção de entrada de biogás no gasômetro foi instalada uma válvula, estilo diafragma, para evitar que o biogás volte pela tubulação quando houver algum problema, como a parada de funcionamento da bomba que leva o esgoto para o biodigestor e conseqüente diminuição do nível de esgoto no biodigestor, permitindo a saída do biogás pelo selo hidráulico.



Figura 43. Grupo motor-gerador com painel de teste.  
Fonte: CENBIO, 2005h.



Figura 44. Painel de comando do grupo motor-gerador.  
Fonte: CENBIO, 2005h.

#### 6.3.14 Análise dos Gases de Exaustão do Grupo Motor-Gerador

Os resultados das análises dos gases de exaustão estão descritos na Tabela 27.

Tabela 27. Resultado das análises dos gases de exaustão do grupo motor-gerador.

Componente	Análises			
	10:38 h	11:00 h	11:10 h	11:20 h
Hidrocarbonetos Totais como CH <sub>4</sub>	3,1%	0,67%	2,7%	0,19%
Monóxido de Carbono (CO)	641 ppm	929 ppm	787 ppm	922 ppm
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	8,8%	*	8,4%	*
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	5 ppm	15 ppm	48 ppm	65 ppm
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	3,7%	5,4%	5,7%	*
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	< 1 ppm	< 1 ppm	< 1 ppm	<1 ppm

Fonte: YAMASHITA, 2005.

Segundo o Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT)<sup>15</sup>, as emissões estão diretamente relacionadas à carga. Durante a análise, o grupo gerador em questão estava submetido a uma carga de 2,4 kW (aproximadamente 17% de sua carga máxima) e, por ser uma carga relativamente baixa, acarretou maior emissão de hidrocarbonetos totais. Como o ajuste da admissão do ar ainda não está em seu ponto ótimo, a queima fica ainda mais incompleta e como consequência mais hidrocarbonetos são emitidos. Pode-se observar uma melhora no decorrer do tempo devido a ajustes feitos durante as análises.

#### 6.4 Comparação entre os Grupos Geradores dos Projetos ENERG-BIOG e PUREFA

Comparando os valores da análise dos gases de exaustão do grupo gerador utilizado no PUREFA com os do ENERG-BIOG, e levando-se em consideração que esta análise foi realizada quando este grupo gerador estava submetido a 60% da carga máxima, observa-se que a emissão de oxigênio, assim como de dióxido de carbono do projeto PUREFA, são menores. A emissão de dióxido de enxofre é baixa, demonstrando mais uma vez a eficiência do sistema de purificação do biogás. Os óxidos de nitrogênio foram gradualmente aumentando, o que é esperado no decorrer do aquecimento do motor. Não se pode comparar a emissão destes óxidos com as do grupo gerador da SABESP de Barueri, pois segundo a White Martins<sup>16</sup>, provavelmente houve diluição destes poluentes na água presente no biogás da SABESP. Por último, as emissões dos hidrocarbonetos totais (THC) no PUREFA são maiores devido à baixa carga que o motor é submetido (0,19% equivale a 1900 ppm – Tabela 27).

Tabela 28. Análise dos gases de exaustão do grupo motor-gerador do projeto ENERG-BIOG, instalado na SABESP de Barueri.

ANÁLISES								
WHITE MARTINS		O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	NO	NO <sub>x</sub>	THC
Número	Data	% vol.	% vol.	ppm	ppm	ppm	ppm	% vol.
1	29/12/2004	9,5	14,7	-	0,65	0,001	0,001	0,16

Fonte: CENBIO, 2005h.

<sup>15</sup> Engenheiro Silvio Figueiredo do agrupamento térmico

<sup>16</sup> Sr. Engenheiro Químico Toshiyuki Yamashita

A Tabela 29 compara os resultados das análises dos gases de exaustão dos grupos geradores dos projetos ENERB-BIOG e PUREFA.

Tabela 29. Comparação dos resultados das análises dos gases de exaustão dos projetos ENERB-BIOG e PUREFA.

Projeto	Data	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	THC
		% vol.	% vol.	ppm	ppm	ppm	% vol.
Energ-Biog	29/12/2004	9,5	14,7	-	0,65	0,001	0,16
PUREFA	30/08/2005 (10:38 h)	3,7	8,8	641	< 1	5	3,1
PUREFA	30/08/2005 (11:00 h)	5,4	-	929	< 1	15	0,67
PUREFA	30/08/2005 (11:10 h)	5,7	8,4	787	< 1	48	2,7
PUREFA	30/08/2005 (11:20 h)	-	-	922	< 1	65	0,19

Fonte: CENBIO, 2005h.

## 6.5 Análise Econômica do Sistema

Foram escolhidos dois cenários sendo o primeiro o mais compatível com as instalações existentes. Porém, ele não permite um cálculo econômico correto, já que o Projeto PUREFA não tinha objetivos econômicos. Para ser mais realista, construímos outro cenário supondo que o mesmo estivesse atrelado a biodigestor com capacidade suficiente para permitir a operação do sistema de geração de acordo com a potência instalada (Moto Gerador).

- Geração de energia elétrica a partir do biogás

Para análise deste sistema, adotou-se dois casos:

1. Cenário 1 - Geração de 2,4 kW (situação real)

Como dados de entrada para esta análise tem-se:

Tabela 30. Custo dos equipamentos

<b>Equipamento</b>	<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>	<b>R\$ Unitário</b>	<b>TOTAL (R\$)</b>
Medidor de Vazão	Medidor de vazão mod. KFG-1009 + indicador remoto de vazão mod. CVT-TEM	1	3.729,60	3.729,60
Horímetro	Contador de Horas 220VCA Ref. 7 KT5 745-3	1	167,16	167,16
Peneira Molecular	Peneira molecular esférica - sistema de purificação	30	76,00	2.280,00
Alongamento da saída do biogás	Peça que proporcionou o alongamento na secção de captação do biogás gerado	1	460,00	460,00
Medidor de Pressão	Medidor da pressão do biodigestor e do gasômetro	1	50,00	50,00
Gasômetro	Armazenador de biogás	1	4.074,65	4.074,65
Grupo Gerador	Grupo motor-gerador com painel de testes e de comando	1	15.000,00	15.000,00
Tubulação	Tubos e conexões	1	145,27	145,27
<b>TOTAL</b>				<b>25.906,68</b>

- Custo do combustível (biogás): 0,00 R\$/m<sup>3</sup>;
- Consumo específico do motor: 5 m<sup>3</sup>/h;
- Potência líquida gerada: 2.4 kW;
- Fator de capacidade: 0,8 a plena carga;
- Meses de operação: 12;
- Horas de operação: 0,67 h/dia;
- Depreciação do equipamento: 21 anos (considerando 0,67 horas/dia de operação);
- Dias: 30 dias/mês;
- Salário mínimo: 300,00 R\$/mês;
- Profissional autônomo (20% de encargos): 360,00 R\$/mês;

**Energia gerada:**

A energia gerada é dado por:

$$Potência \cdot líquida \times fator \cdot capacidade \times meses \cdot operação \times dias \cdot operação \times horas \cdot operação \quad (29)$$

$$Energia \cdot gerada = 2,4 \times 0,8 \times 12 \times 30 \times 0,67 = 463,10 \text{ kWh/ano} = 0,4631 \text{ MWh/ano}$$

**Custo do combustível:**

Pelo fato do biogás ser considerado um subproduto da digestão anaeróbia, seu custo é nulo.

**Custo do operador - equivalente as horas de operação do sistema (20 h/mês)**

Para o custo do operador, tem-se:

$$\frac{horas \cdot operação \times dias \times profissional \cdot atômomo(20\% \cdot de \cdot encargos)}{horas \cdot por \cdot mês \cdot trabalhadas} \quad (30)$$

$$\frac{0,67 \times 30 \times 360,00}{160}$$

$$Custo \cdot operador = 45,23 \text{ R\$/mês} = 542,76 \text{ R\$/ano}$$

Dividindo o custo do operador pela energia gerada no ano, tem-se:

$$\frac{Custo \cdot operador}{Energia \cdot gerada} \quad (31)$$

$$\frac{542,76}{463,10} = 1,17 \text{ R\$/kWh}$$

**Custo total de operação:**

O custo total de operação é dado por:

$$\text{Custo} \cdot \text{combustível} + \text{custo} \cdot \text{operador} \quad (32)$$

$$0,00(\text{R\$ / kWh}) + 1,17(\text{R\$ / kWh}) = 1,17 \text{ R\$/kWh}$$

**Custo de manutenção (4% do valor do equipamento por ano):**

O custo de manutenção é dado por:

$$\frac{\text{Custo} \cdot \text{equipamentos} \times 0,04}{\text{Energia} \cdot \text{gerada}} \quad (33)$$

$$\frac{25.906,68 \times 0,04}{463,1} = 2,24 \text{ R\$/kWh}$$

**Depreciação:**

O custo da depreciação é dado por:

$$\frac{\frac{\text{Custo} \cdot \text{equipamentos}}{\text{Depreciação} \cdot \text{equipamentos}}}{\text{Energia} \cdot \text{gerada}} \quad (34)$$

$$\frac{\frac{25.906,68}{21}}{463,10} = 2,66 \text{ R\$/kWh}$$

**Custo de geração:**

O custo de geração é dado por:

$$\text{Custo} \cdot \text{operação} + \text{custo} \cdot \text{manutenção} + \text{custo} \cdot \text{depreciação} \quad (35)$$

$$1,17 + 2,24 + 2,66 = 6,07 \text{ R\$/kWh} = 6.070 \text{ R\$/MWh}$$

### **Custo de O&M:**

O custo de O&M é dado por:

$$\text{Custo} \cdot \text{total} \cdot \text{operação} + \text{Custo} \cdot \text{manutenção} \quad (36)$$

$$1,17 + 2,24 = 3,41 \text{ R\$/kWh} = 3.410 \text{ R\$/MWh}$$

A demanda de energia elétrica do CTH é cerca de 100.000 kWh/mês, ou seja, 1.200.000 kWh/ano. Considerando que toda a energia gerada nesse caso fosse levada à rede, o CTH teria uma redução de apenas 0,039% no consumo de energia elétrica comprada da concessionária.

### **Tempo de Retorno de Investimento**

- Demanda de energia elétrica no CTH: 100.000 kWh/mês;
- Custo de energia elétrica comprada da rede: 0,299 R\$/kWh (tarifa comercial, segundo a AES Eletropaulo);
- Gastos com energia elétrica no CTH:  $100.000 * 0,299 = 29.900,00$  R\$/mês
- Custo dos equipamentos: 25.906,68 R\$
- Geração de energia elétrica através do grupo gerador a biogás: 38,59 kWh/mês;
- Economia de energia elétrica (R\$ por mês), sem contar o custo do operador: R\$ 11,54;
- Tempo de retorno do investimento: 2.245 meses = 187 anos.

## 2. Cenário 2 - Geração de 14 kW (potência máxima do grupo gerador e geração contínua)

Como dados de entrada para esta análise tem-se:

- Custo dos equipamentos: 25.906,68 R\$
- Custo do combustível (biogás): 0,00 R\$/m<sup>3</sup>;
- Consumo específico do motor: 9 m<sup>3</sup>/h;
- Potência líquida gerada: 14 kW;
- Fator de capacidade: 0,8 a plena carga;
- Meses de operação: 12;
- Horas de operação: 24 h/dia;
- Depreciação do equipamento: 0,6 anos (considerando 24 horas/dia de operação);
- Dias: 30 dias/mês;
- Salário mínimo: 300,00 R\$/mês;
- Profissional autônomo (20% de encargos): 360,00 R\$/mês;

### **Energia gerada:**

A energia gerada é dada através da equação (29):

$$Energia \cdot gerada = 14 \times 0,8 \times 12 \times 30 \times 24 = 96.768,00 \text{ kWh ano}$$

### **Custo do combustível:**

Pelo fato do biogás ser considerado um subproduto da digestão anaeróbia, seu custo é nulo.

**Custo do operador - equivalente às horas de operação do sistema (24 h/dia), portanto, necessita-se de três operadores, sendo um para cada turno**

O custo do operador é dado pela equação (30):

$$\frac{24 \times 30 \times 1.080,00}{160}$$

$$Custo \cdot operador = 1.620,00 \text{ R$/mês} = 19.440,00 \text{ R$/ano}$$

Dividindo o custo do operador pela energia gerada no ano (equação 31), tem-se:

$$\frac{19.440,00}{96.768,00} = 0,20 \text{ R\$/kWh}$$

**Custo total de operação:**

O custo total de operação é dado pela equação (32):

$$0,00(\text{R\$/kWh}) + 0,20(\text{R\$/kWh}) = 0,20 \text{ R\$/kWh}$$

**Custo de manutenção (4% do valor do equipamento):**

O custo de manutenção é dado pela equação (33):

$$\frac{25.906,68 \times 0,04}{96.768,00} = 0,01 \text{ R\$/kWh}$$

**Depreciação:**

O custo da depreciação é dado pela equação (34):

$$\frac{\frac{25.906,68}{0,6}}{96.768,00} = 0,45 \text{ R\$/kWh}$$

**Custo de geração:**

O custo de geração é dado pela equação (35):

$$0,20 + 0,01 + 0,45 = 0,66 \text{ R\$/kWh} = 660,00 \text{ R\$/MWh}$$

**Custo de O&M:**

O custo de O&M é dado pela equação (36):

$$0,20 + 0,01 = 0,21 \text{ R\$/kWh} = 210,00 \text{ R\$/MWh}$$

Considerando que toda a energia gerada nesse caso fosse levada à rede, o CTH teria uma redução de 8,1% no consumo de energia elétrica comprada da concessionária.

Para que esse caso ocorresse, seria necessário uma produção de gás equivalente à 216 m<sup>3</sup>/dia, conseqüentemente, um biodigestor de maior porte para permitir operação contínua.

Em ambos os cenários estudados, foram somente considerados os custos envolvidos com o sistema de geração de energia elétrica, desde a captação do biogás no biodigestor até sua utilização como combustível. Vale ressaltar que não foram levados em consideração os custos envolvidos com o sistema de pré-tratamento do efluente e com o biodigestor, pois os mesmos foram implantados antes da execução do projeto PUREFA.

### **Tempo de Retorno de Investimento**

- Demanda de energia elétrica no CTH: 100.000 kWh/mês;
- Custo de energia elétrica comprada da rede: 0,299 R\$/kWh (tarifa comercial, segundo a AES Eletropaulo);
- Gastos com energia elétrica no CTH:  $100.000 * 0,299 = 29.900,00$  R\$/mês
- Custo dos equipamentos: 25.906,68 R\$
- Geração de energia elétrica através do grupo gerador a biogás: 8.064 kWh/mês;
- Economia de energia elétrica (R\$ por mês), sem contar o custo do operador: R\$ 2.411,14;
- Tempo de retorno do investimento: 10,74 meses.

Neste caso, o sistema de geração de energia elétrica seria viável, tendo em vista o tempo de retorno de investimento.

## 6.6 Cálculo dos Créditos de Carbono

### 1. Cenário 1 - Geração de 2,4 kW (situação real)

Como dados de entrada para os cálculos de créditos de carbono, tem-se:

- Potência da planta de geração de energia a partir de biogás no CTH: 0,0024 MW;
- Tempo de operação da planta: 244,55 horas/ano;
- Energia total gerada:

A energia total gerada é dada pela equação (22)

$$Energia \cdot total \cdot gerada = 0,0024 \times 244,55 = 0,587 \text{ MWh/ano}$$

- Fator de intensidade de carbono: 0,5 tCO<sub>2</sub> eq/MWh;
- Total de CO<sub>2</sub> eq. evitado:

O total de CO<sub>2</sub> eq. evitado é dado pela equação (23)

$$Total \cdot de \cdot CO_2 \cdot eq. \cdot evitado = 0,587 \times 0,5 = 0,29 \text{ tCO}_2 \text{ eq./ano}$$

- Valor de Certificado de Emissões Evitadas (CEE): US\$ 10,00/tCO<sub>2</sub> eq.;
- Total de US\$ em certificados:

O total de US\$ em certificados é dado pela equação (24)

$$Total \cdot de \cdot US\$ \cdot em \cdot certificados = 0,29 \times 10 = 2,9 \text{ US\$/ano}$$

- Vida útil da planta: 21 anos;
- Total de US\$ durante a vida útil da planta:

O total de US\$ durante a vida útil da planta é dado pela equação (25)

$$\text{Total de US\$ durante a vida útil da planta} = 2,9 \times 21 = 60,9 \text{ US\$}$$

## 2. CENÁRIO 2 - Geração de 14 kW (potência máxima do grupo gerador e geração contínua)

Como dados de entrada para os cálculos de créditos de carbono, tem-se:

- Potência da planta de geração de energia a partir de biogás no CTH: 0,014 MW;
- Tempo de operação da planta: 8.640 horas/ano;
- Energia total gerada:

A energia total gerada é dada pela equação (22)

$$\text{Energia total gerada} = 0,014 \times 8.640 = 120,96 \text{ MWh/ano}$$

- Fator de intensidade de carbono: 0,5 tCO<sub>2</sub> eq/MWh;
- Total de CO<sub>2</sub> eq. evitado:

O total de CO<sub>2</sub> eq. evitado é dado pela equação (23)

$$\text{Total de CO}_2 \text{ eq. evitado} = 120,96 \times 0,5 = 60,48 \text{ tCO}_2 \text{ eq./ano}$$

- Valor de Certificado de Emissões Evitadas (CEE): US\$ 10,00/tCO<sub>2</sub> eq.;
- Total de US\$ em certificados:

O total de US\$ em certificados é dado pela equação (24)

$$\text{Total de US\$ em certificados} = 60,48 \times 10 = 604,80 \text{ US\$/ano}$$

- Vida útil da planta: 0,6 anos;
- Total de US\$ durante a vida útil da planta:

O total de US\$ durante a vida útil da planta é dado pela equação (25)

$$\text{Total de US\$ durante a vida útil da planta} = 604,80 \times 0,6 = 362,88 \text{ US\$}$$

## 6.7 Elaboração de Cenários para Maior Eficiência do Processo

Para maior eficiência do processo, pode-se citar um sistema mais eficiente do que as tecnologias atualmente empregadas. O tratamento do efluente segue o seguinte procedimento:

- Mistura da biomassa;
- Hidrólise da biomassa para a remoção de compostos que poderiam vir a gerar CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S;
- Etapa da biodigestão, que é uma combinação da digestão mesofílica (38 °C) com a termofílica (55 °C) em biodigestor com sistema de agitação por meio de pratos que se movimentam com baixo consumo de energia.

Tal processo traz as vantagens de gerar biogás de qualidade, com menor teor de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, em volumes cerca de duas vezes superior aos biodigestores convencionais que atuam ou na fase mesofílica ou na termofílica, além de poder utilizar vários tipos de biomassa combinados com concentrações de sólidos de até 25% (BORELLI et al., 2005).

Esse tipo de tecnologia pode ter seus custos de instalação reduzidos quando adaptada às condições brasileiras, pois outros materiais construtivos para os biodigestores devem ser empregados, como por exemplo, a madeira.

## **7. UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA**

### **7.1 Vantagens, Desvantagens e Barreiras Existentes**

A recuperação do biogás é um processo que envolve várias etapas. O papel da agência ambiental é promover este aproveitamento, criar um mercado fornecedor de tecnologias de recuperação e estimular o mercado possuidor de aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes a praticar esta recuperação. A agência ambiental deve também, observar o bom emprego dos recursos financeiros de forma que esta prática se reproduza em larga escala (ALVES, 2000).

O proprietário de um aterro sanitário, normalmente é uma prefeitura ou uma companhia coletora de resíduos sólidos urbanos. Já uma estação de tratamento de efluentes, geralmente é a indústria geradora de efluentes ou uma empresa terceirizada, uma vez que há uma crescente tendência de especialização por parte das organizações, concentrando seu quadro de funcionários na atividade fim da indústria.

Para garantir um sistema de recuperação do biogás, técnico e economicamente, deve haver disponibilidade de biogás, operação satisfatória do sistema e garantia de compra do excedente de energia gerado. Além de incentivar a melhor prática, a agência ambiental deve impor a correta queima do biogás em queimadores ou seu uso para fins energéticos e/ou térmicos.

A relação entre os ganhos com a venda do excedente de energia gerado e os gastos de implementação, operação e manutenção definem o produto final – o lucro, que viabiliza um empreendimento. Todavia os benefícios da recuperação do biogás não são contabilizados na avaliação econômica do projeto.

Projetos de recuperação do biogás gerado na estação de tratamento de efluentes são diferentes do biogás gerado em aterros sanitários. No segundo caso, a quantidade de produção de biogás é maior, além de ser mais rico em metano (ALVES, 2000).

Os digestores anaeróbios são peças importantes na recuperação do biogás. Na maioria das vezes, uma instalação não é desenvolvida com o objetivo de gerar biogás e sim, tratar o efluente, preservando a qualidade do ar e dos corpos d'água.

De um modo geral, a digestão anaeróbia no tratamento de efluentes possui as seguintes vantagens (adaptado de VON SPERLING, 1995):

- Baixo custo de implantação;
- Elevada sustentabilidade do sistema. Pouca dependência de fornecimento de energia, peças e equipamentos de reposição;
- Simplicidade operacional, de manutenção e controle;
- Baixos custos operacionais;
- Adequada eficiência na remoção das diversas categorias de poluentes (matéria orgânica biodegradável, sólidos suspensos, nutrientes e patogênicos);
- Pouco ou nenhum problema com a disposição do lodo gerado no sistema;
- Baixos requisitos de área;
- Possibilidade de aplicação em pequena escala (sistemas descentralizados) com pouca dependência da existência de grandes interceptores;
- Fluxograma simplificado de tratamento;
- Elevada vida útil;
- Ausência de problemas que causem transtorno à população vizinha;
- Possibilidade de recuperação de subprodutos úteis, como biofertilizante, visando sua aplicação na fertilização de culturas agrícolas; e o biogás, um gás combustível de elevado teor calorífico.

Por outro lado, há riscos de acidentes associados à recuperação, armazenamento e uso do biogás, tanto em estações de tratamento de efluentes como em aterros sanitários (VIEIRA et al., 1998).

A análise de impacto ambiental de uma instalação de recuperação energética do biogás pode apresentar impactos positivos e negativos:

- Impactos positivos: o biogás contém compostos orgânicos voláteis, que são os principais contribuintes para o efeito estufa e que incluem em seu escopo poluentes tóxicos. Quando pouco ou nada é feito para controlá-los, estes compostos são lentamente e continuamente lançados à atmosfera como produto da degradação da matéria orgânica contida no efluente. Quando o biogás é coletado e queimado em um sistema de obtenção de energia, estes compostos são destruídos, evitando a consequente perda ambiental;
- Impactos negativos: análise de risco de acidentes, visando evitá-los.

A manutenção das condições originais de segurança é um obstáculo ao aproveitamento do biogás gerado pelos sistemas anaeróbios devido ao metano contido no biogás, podendo tornar-se um problema de segurança para a empresa que o recupera. Para que sejam evitados tais problemas o biogás é usualmente queimado em *flares*.

Segundo Tommasi (1994), a avaliação de risco de uma instalação pode utilizar diversos métodos, entre eles:

- Árvore de falhas: identificação das combinações entre falhas nos equipamentos e erros humanos que culminem em um acidente;
- Análise do erro humano: identificação dos erros humanos e suas conseqüências;
- Checklist: identificação dos perigos mais freqüentes;
- Inspeção de segurança: segurança das instalações e dos procedimentos de operação e manutenção sejam os propostos no projeto do sistema;
- Índice de baixo risco: classificação das unidades do sistema com base no seu grau de risco;
- Análise preliminar de risco: análise dos materiais perigosos e dos principais elementos da indústria antes da sua instalação, orientando projeto mais seguro;
- Hazop: identificação dos perigos e da operacionalidade do processo.

Segundo a CETESB (1994) a análise de risco é a identificação metódica de elementos e situações em uma instalação que possam gerar uma condição de risco para quem nela trabalha e para o público em geral.

Para a inserção da prática de energias renováveis na matriz energética brasileira, enfrenta-se três tipos de barreiras: a econômica, a financeira e a política (ALTOMONTE et al., 2003 ):

- Barreira econômica: dificuldade de concorrência com as fontes fósseis dentro de um mercado liberalizado;
- Barreira financeira: falta de regulamentação clara para diminuir os riscos e incentivar o investidor privado a financiar as fontes renováveis. A desestruturação do setor energético em vários países tem dificultado esta inserção;

- Barreira política: dificuldade de definir a extensão que o governo pode intervir no setor, caso isto seja necessário. Sendo necessário, deve-se buscar apoio político formando coalizões com todos os seguimentos engajados nos objetivos da proposta de intervenção.

Para a recuperação de biogás para fins energéticos, são identificadas poucas empresas remanescentes com tecnologia apropriada para o desenvolvimento de projetos desse gênero.

Geralmente, o uso de equipamentos para operar com biogás depende de uma adaptação. Em geral, uma adaptação de baixo custo não é satisfatória, pois o rendimento energético é inferior, os intervalos entre paradas para manutenção são menores e a confiabilidade do equipamento reduz-se drasticamente (ALVES, 2000).

O aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica é feito pela sua queima e esta queima é mais proveitosa em uma máquina de combustão interna, como motor ciclo Otto e turbina a gás, que ainda dispõe calor residual.

Para a instalação de um sistema de geração de energia elétrica em uma empresa, deve-se considerar, antes de tudo, a necessidade energética da empresa interessada. Uma empresa que necessite calor em seu processo pode substituir parte do seu combustível principal pelo biogás. Este uso pode ser feito pela mistura de combustíveis ou pela introdução de um estágio alternativo, onde o biogás forneceria parte da energia permitindo a redução do consumo energético do estágio principal.

Entretanto, para a implantação de um sistema de aproveitamento energético do biogás, tanto em estações de tratamento de efluentes como em aterros sanitários, deve-se levar em consideração que alguns equipamentos e produtos específicos não são nacionais (compressores, medidores de vazão, filtros, entre outros), o que impacta nos custos de capital dos projetos (impostos, estadias, transportes, taxas de câmbio e pagamento de amortização, entre outros), além do alto custo das tecnologias de geração de energia elétrica.

A falta de leis que impulsionem o mercado nesse sentido também é um fator que pesa contra a utilização desta fonte de energia, seja na adoção de políticas de incentivo (tarifárias e subsídios), seja com instrumentos de regulação (tecnologias mais eficientes).

## **7.2 Políticas para Implementação de Energia Descentralizada**

A produção de energia descentralizada a partir de fontes renováveis, aproveita recursos energéticos locais ou em regiões de difícil atendimento pelos sistemas convencionais, possibilitando soluções mais adequadas e de menor custo global.

Além das perspectivas de maior desenvolvimento desta tecnologia em todo o mundo, o setor elétrico brasileiro vem utilizando mecanismos de incentivos ao uso da biomassa para geração de energia elétrica. Um destes mecanismos foi o Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) de 2001, lei federal nº 10.438, onde estabeleceu que 3.300 MW de potência instalada fossem adicionadas ao sistema elétrico brasileiro a partir de fontes de energia renováveis, num total de 1.100 MW por fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa. Além disso, o Programa estabelece que os produtores desta energia terão a garantia de venda por um prazo de até 15 anos e o estabelecimento de um valor de referência compatível com as características técnico e econômicas de cada projeto.

Ao lado de todos os princípios para sistemas de energia descentralizada a partir de biogás, além do PROINFA e do MDL e Protocolo de Kyoto, citados em capítulo anterior, destaca-se a necessidade de desenvolvimento de instrumentos para implementar algumas diretrizes, entre elas: políticas; legislativas; administrativas e institucionais; tecnológicas e financeiras e fiscais (Declaração de Brasília, 1995).

### **7.2.1 Diretrizes Políticas**

- Adequar as políticas governamentais de tarifas, de preços mínimos, de incentivos fiscais, de tecnologia, de meio ambiente e de subsídios aos energéticos de forma a promover o desenvolvimento da energia a partir do biogás;
- Garantir, dado o seu caráter estratégico, a continuidade dos programas de energia a partir de biomassa já implantados, otimizando fatores tecnológicos e custos, visando ganhos de competitividade;
- Estimular a produção de energia a partir de biogás por meio de legislação específica, de facilidades de financiamento e da garantia de compra;

- Incentivar a utilização da energia térmica proveniente do biogás, a fim de reduzir a instalação de aquecimento elétrico;
- Definir programa interministerial para utilização da energia a partir de biogás, com coordenação centralizada ao nível federal e gestão descentralizada ao nível dos estados e municípios, com recursos provenientes de fundos federais, para investimentos sustentados no longo prazo e com base em transferências intra-setoriais; de fundos estaduais e municipais complementares; e de recursos com setor privado, como por exemplo da isenção de impostos e taxas (IPI, Imposto de Renda e outros);
- Propor programas específicos, de caráter regional, através da realização de projetos de desenvolvimento social;
- Definir sub-políticas especiais com a participação de representantes de segmentos produtivos e sociais;
- Incentivar a formação de cooperativas, visando promover, implementar e assegurar a produção de biogás destinado à geração de energia;
- Promover o uso da energia a partir de biogás, de maneira sustentável, utilizando a proteção do meio ambiente local, regional, nacional e global;
- Compatibilizar a oferta de biogás com as políticas nacionais e regionais de meio ambiente;
- Destacar nas negociações multilaterais os benefícios ambientais decorrentes da utilização do biogás para geração de energia, visando obtenção de recursos dos países com maiores níveis de emissão de poluentes.

### **7.2.2 Diretrizes Legislativas, Administrativas e Institucionais**

- Constituir Câmara Temática que contemple a energia a partir de biogás, no âmbito da Comissão Nacional de Energia;
- Promover a regulamentação da participação do capital privado, nacional e estrangeiro, na produção de energia a partir de biogás;
- Estabelecer regulamentação específica para compra, venda e transporte de energia elétrica, produzida a partir de biogás;

- Flexibilizar a exigência de reserva operativa para acesso ao Sistema Nacional de Transmissão de Energia Elétrica, para geradores de energia elétrica a partir de biogás, mantida a qualidade de fornecimento ao usuário;
- Definir órgão de certificação e homologação da tecnologia, visando reconhecimento internacional;
- Determinar aos agentes financeiros oficiais a inclusão, entre as linhas prioritárias de crédito e financiamento, dos projetos destinados ao desenvolvimento do aproveitamento da energia a partir do biogás, de forma similar à do decreto 1040/94, destinado à conservação e uso racional da energia e ao aumento da eficiência energética;
- Viabilizar processos de incubação de empresas emergentes como ação do Estado para apoiar as iniciativas industriais e rurais sobre a energia a partir do biogás.

### **7.2.3 Diretrizes Tecnológicas**

- Inventariar, sob coordenação dos órgãos municipais e estaduais, com o apoio de órgãos do governo federal, o potencial de energia a partir de biogás disponível;
- Estabelecer e divulgar um zoneamento dos potenciais de biogás existentes no território nacional, considerando aspectos regionais e os impactos sobre o meio ambiente;
- Identificar e apoiar Centros de Excelência, Centros de Desenvolvimento Regional e laboratórios especializados de energia proveniente de biomassa, fortalecendo estas instituições e priorizando os recursos disponíveis;
- Estimular a nacionalização das tecnologias de conversão energética do biogás;
- Estimular a realização de projetos visando a demonstração da viabilidade técnica, econômica e sócio-ambiental da utilização do biogás, e a formação de recursos humanos;
- Fomentar a pesquisa e o desenvolvimento científico e tecnológico na área de biogás;
- Estimular as instituições de pesquisa e desenvolvimento a realizar programas cooperativos, direcionando as atividades para tecnologias de produção e aproveitamento de biogás economicamente viável num mercado competitivo.

#### **7.2.4 Diretrizes Financeiras e Fiscais**

- Implementar linhas de crédito para indústria, produtores e usuários da energia proveniente do biogás, pessoas físicas ou jurídicas, com prazos de carência, taxas de retorno e períodos de amortização que viabilizem o desenvolvimento da energia a partir do biogás;
- Promover a criação de fundos rotativos para a energia a partir do biogás, geridos por associações, cooperativas ou ONG's;
- Criar mecanismos compensatórios para os produtores de energia que utilizem biogás, tais como a depreciação acelerada e créditos tarifários por período definido, visando cobrir diferenças de custos operacionais;
- Revisar as alíquotas de importação, reduzindo-as para componentes de alto conteúdo tecnológico e aumentando-as para produtores finais, artificialmente baratos, especialmente aqueles com similar nacional;
- Estabelecer mecanismos de incentivos fiscais, temporários e decrescentes, para os produtores e consumidores que utilizem energia a partir de biogás, sobretudo em projetos de demonstração;
- Privilegiar o uso de energia a partir de biogás na implementação de programas de desenvolvimento social;
- Estender os incentivos de proteção ambiental para incluir aplicações da energia a partir do biogás produzido de maneira sustentável.

## 8. CONCLUSÕES

As tecnologias de digestão anaeróbia e de aproveitamento do biogás têm-se revelado eficazes no tratamento e valorização de resíduos e na mitigação do efeito estufa, com baixos custos de operação, possibilitando ainda a produção de energia elétrica, evitando custos ambientais correspondentes às fontes convencionais.

O biogás possui diversas aplicações de caráter energético. Embora sua principal aplicação seja como combustível em um motor de combustão interna a gás, que movimenta um gerador de energia elétrica, ele pode ser direcionado para outros fins. Dentre suas aplicações destacam-se o uso do biogás em aquecedores a gás para produção de água quente para condicionamento ambiental ou para calor de processo, uso para secagem de grãos em propriedades rurais, secagem de lodo em ETE's, queima em caldeiras, no aquecimento de granjas e de porcos, uso veicular, cocção, iluminação a gás, entre outros.

Além dessas aplicações, o biogás pode ser queimado em *flare*, evitando assim a emissão de metano para a atmosfera. Quando queimado em *flare*, representa uma quantidade de energia que sai do sistema sem ter o seu potencial energético aproveitado. Já quando utilizado no processo, colabora para reduzir o consumo específico da planta.

A utilização do biogás não pode ser feita de forma direta, uma vez que é necessário remover algumas impurezas nele contidas. Este procedimento deve ser feito após sua coleta e antes da sua aplicação em algum processo. As necessidades de tratamento dependem da aplicação do uso final. Na utilização do biogás como combustível em motores ciclo Otto, que é o caso do projeto PUREFA, ou em turbinas a gás, como no projeto ENERBIOG, o tratamento mínimo requerido refere-se à retirada de umidade e do ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) presentes no biogás, evitando assim possíveis danos aos equipamentos pertencentes ao processo de conversão energética do mesmo.

As tecnologias disponíveis de recuperação energética do biogás no país ainda apresentam custos elevados. Os equipamentos são, em sua maioria, importados, o que ocorre não por desconhecimento tecnológico, mas porque a escala de produção atual não permite a viabilidade econômica destes fabricantes no país. Somente recentemente estão começando a aparecer fabricantes nacionais, mas ainda para sistemas de pequeno porte, destinados principalmente à zona rural.

De um modo geral, o processo de recuperação do biogás em aterros sanitários, é incompleto, pois permite um aproveitamento de aproximadamente 40% do total de biogás produzido. Já em ETE's, o aproveitamento do biogás pode ser de 100%, porém, a implementação de uma planta para qualquer dessas aplicações, possui um custo elevado, proporcionando um tempo longo de retorno de investimento.

Mesmo numa ETE, com grande aproveitamento do biogás não é possível torna-la auto-suficiente em energia devido à grande demanda de eletricidade requerida pelos equipamentos do processo de tratamento de esgoto. Entretanto, as estações podem apresentar uma redução no consumo de eletricidade proveniente da rede, permitindo assim, um ganho significativo em termos de eficiência energética.

O uso energético do biogás de aterro pode influenciar positivamente a administração dos municípios, promovendo o bom gerenciamento dos resíduos, gerando empregos, incentivando o desenvolvimento tecnológico e a abertura de novos mercados. Além disso, promove a geração de energia elétrica próxima ao centro de consumo e colabora para o aumento da eficiência energética global do aterro, tornando-o auto-suficiente, para a viabilidade do saneamento básico no país e para a comercialização da energia excedente gerada e dos créditos de carbono.

Em relação à venda de energia, o contrato com as concessionárias torna-se difícil, não só pelo fato de ser uma energia mais cara, mas também porque essas concessionárias querem uma garantia de fornecimento contínuo e qualidade de energia.

No estudo de caso do projeto PUREFA, conclui-se que o sistema de digestão anaeróbia pode tratar o esgoto proveniente do CRUSP, evitando problemas ambientais, e pode também produzir um volume de 4 m<sup>3</sup>/dia de biogás. Volume este insuficiente para que o grupo gerador de 18 kW funcione continuamente, sem paradas. Daí a necessidade de armazenamento do biogás, antes de ser queimado no motor.

Dois casos foram analisados. O primeiro, situação real, foi estudada a geração de 2,4 kW de energia elétrica, que é simulada por uma carga composta por lâmpadas e resistências. Essa energia gerada equivale a 0,039% da energia consumida pelo CTH. No segundo caso, foi estudada a geração de 14 kW de energia elétrica, equivalente à potência máxima do motor, permitindo o funcionamento contínuo do sistema de geração de energia elétrica. Essa energia gerada equivaleria a 8,1% da energia consumida pelo CTH, situação esta que seria viável, caso a energia fosse utilizada pelo CTH.

Finalizando, o biodigestor implementado no CTH trata o esgoto proveniente do CRUSP. A quantidade total de esgoto é produzida pelo equivalente à cerca de 439 pessoas, segundo cálculo demonstrado no capítulo 5. Para esta pequena planta, o aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica torna-se inviável economicamente, pois a quantidade de energia gerada pelo sistema, conforme dados apresentados nos dois casos analisados, é baixa em relação à demanda de energia do CTH. Como citado anteriormente, as metas desenvolvidas no estudo de caso, têm como finalidade verificar a viabilidade do uso de biogás para geração de energia elétrica em motores ciclo Otto. Sendo assim, a inviabilidade econômica do sistema, não deve ser levada em consideração, já que trata-se de projeto piloto.

Em termos de aproveitamento do biogás para geração de energia, o tamanho da ETE é de fundamental importância. Para que a produção de biogás seja regular ao longo de 24 horas, a ETE deverá atender, no mínimo, uma população de 10.000 habitantes, com capacidade de geração de 5.544 kWh/mês.

## **8.1 Trabalhos Futuros**

Pretende-se, através de financiamento, dar continuidade ao projeto PUREFA por meio da implementação de um sistema de monitoramento da energia gerada, além das análises dos gases de exaustão emitidos para a atmosfera, disponibilizando o sistema aos professores e alunos para aulas e estudos.

Os resultados deste projeto servirão de subsídios técnicos e ambientais para replicar a geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto em outras pequenas unidades, incentivar a utilização de fontes renováveis de energia elétrica, que pode ser utilizada para acionar a própria unidade, diminuindo os custos envolvidos no processo de tratamento de esgoto, colaborando com o saneamento ambiental.

### **8.1.1 Metodologia a ser Adotada**

Será elaborado um anteprojeto da instalação de monitoramento do sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás, que permitirá determinar a obra de construção civil a ser executada, bem como a necessidade de equipamentos de instrumentação e controle, tais como:

- Medidor de temperatura do biogás: equipamento a ser utilizado para medir a temperatura do biogás na entrada do gasômetro e do grupo gerador;
- Medidor de vazão do biogás: equipamento a ser utilizado para medir a quantidade de biogás consumido pelo motor;
- Cromatógrafo gasoso: equipamento a ser utilizado para realização das análises físico-químicas dos gases de exaustão do grupo gerador;
- Tubulação para a água: tubulação a ser utilizada no ciclo fechado (cuba eletrolítica – trocador de calor – radiador ventilado – cuba eletrolítica);
- Válvulas: equipamentos a serem utilizados na tubulação do sistema;
- Cuba eletrolítica: equipamento a ser utilizado, a partir da energia gerada pelo grupo gerador, para aquecimento da água;
- Bomba: equipamento a ser utilizado para bombear a água da cuba eletrolítica até o trocador de calor;
- Trocador de calor: equipamento a ser utilizado para esfriar a água quente proveniente da cuba eletrolítica;
- Radiador ventilado: equipamento a ser utilizado para assegurar o resfriamento da água;
- Quadro de comando automático: quadro de comando, com sensor e software, a ser utilizado para monitoramento do sistema a longa distância;
- Datalogger: equipamento a ser utilizado para coletar informações, armazená-las e trabalhá-las;
- Transdutor: equipamento a ser utilizado para transformar os sinais medidos.

Após a instalação do sistema e posterior posta em marcha, será realizado o monitoramento do sistema e estudada a influência de parâmetros operacionais, tais como pressão e temperatura do biogás, no tempo de operação do grupo gerador e no seu desempenho. Serão realizadas, também, análises periódicas da composição dos gases de exaustão, para avaliar a queima do biogás no grupo gerador a partir dos gases emitidos para a atmosfera.

Pretende-se, no decorrer do projeto, formar recursos humanos pela capacitação de pessoal, na operação e manutenção da tecnologia a ser utilizada.

## 9. REFERÊNCIAS

ALVES, J.W.S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. 142 p. São Paulo, 2000.

ALVES, J.W.S.; VIEIRA, S.M.M. **Inventário nacional de emissões de metano pelo manejo de resíduos**. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – CETESB. 88p. São Paulo, 1998.

ALTOMONTE, H.; COVIELLO, M.; LUTZ, W.L. **Renewable energy and energy efficiency in Latin America and the Caribbean: constraints and prospects**. Serie: Recursos Naturales e Infraestructura. Chile, 2003.

ALVIM, G.C.L.; CHAGAS, F. **Certificado da análise do biogás**. Relatório de Ensaio. COMGAS – Companhia de Gás de São Paulo. São Paulo, 2003.

ANGELO, G.S.Jr. **Certificado de Análise do Efluente**. Relatório de Ensaio. Ambiental Laboratório e Equipamentos Ltda. São Paulo, 2003.

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

BARBOSA, R.A. **Tratamento anaeróbio de esgoto sanitário em reator de fluxo ascendente com leito de lodo**. Rio de Janeiro : s.c.p., 1.988. 242 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. – COOPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1.988.

BENINCASA, M.; ORTOLANI; A. F.; LUCAS JUNIOR, J. **Biodigestores convencionais**. Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, p1-15, 1990.

BERTULANI, C. **Projeto de ensino de física a distância**, 2002. Disponível: [www.if.ufrj.br/teaching/fis2/segunda\\_lei/segunda\\_lei.html](http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/segunda_lei/segunda_lei.html). Acesso em 04/12/2005.

BOLETIM ENFOQUE – **Biodigestor “PE”, fonte alternativa energética e de biofertilizantes** – Edição 03, Recife, 1999.

BORELLI, S.; CORTEZ, C.L.; PECORA, V. **Biogás: uma alternativa energética sustentável**. Artigo Técnico. Revista Petro & Química – Petróleo, Gás, Petroquímica, Química. Ed. Valet. Ano XXVIII – n. 274. São Paulo, 2005.

BRAILE P.M. **Dicionário inglês português de poluição industrial**. Serviço Social da Indústria. Rio de Janeiro, 1983.

CARDOSO FILHO, E.P., **Fatores que influenciam na digestão anaeróbia de efluentes líquidos**. Sem publicação. CETESB, 2001

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

\_\_\_\_\_2003b. **Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENERGI-BIOG**. Relatório de Atividades. Relatório Técnico. São Paulo, 2003.

\_\_\_\_\_2003c. **Projeto Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas – PUREFA**. Relatório de Acompanhamento. São Paulo, 2003.

\_\_\_\_\_2003d. **Fluxograma do Processo de Instalação dos Equipamentos do Projeto PUREFA**. Relatório de Acompanhamento. São Paulo, 2003.

\_\_\_\_\_2004e. **Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENERGBIOG**. Relatório de Atividades. Relatório Técnico. São Paulo, 2004.

\_\_\_\_\_2004f. **Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENERGBIOG**. Relatório Técnico Final. São Paulo, 2004.

\_\_\_\_\_2004g. **Projeto Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas – PUREFA**. Relatório de Acompanhamento. São Paulo, 2004.

\_\_\_\_\_2005h. **Projeto Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas – PUREFA**. Relatório Técnico Final. São Paulo, 2005.

\_\_\_\_\_2006i. **Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENERGBIOG**. Relatório Final de Atividades. São Paulo, 2006.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Manual de orientação para a elaboração de estudo de análise de risco**. Setor de Análise de Risco (ERAA) da CETESB. 54 p. São Paulo, 1994.

CHAMBERS, A. K.; POTTER, I. **Gas utilization from sewage waste**. AIDIS-CANADA, Environmental Project, 2002.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – reatores anaeróbios**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. 246 p. Belo Horizonte, 1997.

CLASSEN, P.A.M; LIER, J.B.; STAMRS, A.J.M. **Utilization of biomass for supply of energy carrier**. Applied microbiology and biotechnology, v.52, p.741-755, 1999.

COELHO, S.T.; SILVA, O.C; VARKULYA, A.Jr.; AVELLAR, L.H.N.; FERLING, F.F. **Estado da arte do biogás**. Relatório de Acompanhamento. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2001.

COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; SILVA, O.C.; VARKULYA JR. A.; PECORA, V. (2003a). **Biodigestor Modelo UASB**. V. Relatório de Acompanhamento. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2003.

\_\_\_\_\_2003b. **Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas – PUREFA**. Trabalho apresentado no Congresso Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável (ICTR). São Paulo, 2003.

\_\_\_\_\_2004c. **Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas – PUREFA**. Trabalho apresentado no X Congresso Brasileiro de Energia (X CBE). Rio de Janeiro, 2004.

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

CUNHA, M. B.; BIANCHINI Jr., I. **Degradação anaeróbia de *Scirpus cubensis* e *Cabomba piauhyensis*: Cinética de formação de gases**. Acta Limnológica Brasileira, 1967.m,

DANTE, G. **Introdução ao estudo dos motores alternativos**, 2003. Motores Endotérmicos. 3ª Edición. Barcelona. Hoepli - Ed. Científico Médica, 1982. Disponível: <http://www.utad.pt/~fsantos/pub-pdf/motalt.pdf>. Acesso em: 15/10/2005.

DECLARAÇÃO DE BRASÍLIA. **Diretrizes e Plano de Ação para o Desenvolvimento das Energias Renováveis Solar, Eólica e de Biomassa no Brasil**. Foro Permanente das Energias Renováveis. Brasília, 1995.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M.C.J.P; ROSSI, M.; TAVARES, R. **Biodigestores Rurais: Modelos Indiano, Chinês e Batelada**. Trabalho apresentado no AGRENER 2002. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, São Paulo, 2002.

ENGENHARIA & PROJETOS. Tecnologias para tratamento de esgotos sanitários, 2001. Disponível: [http://www.enge.com.br/esgoto\\_tecnologia.htm](http://www.enge.com.br/esgoto_tecnologia.htm). Acesso em 27/02/2005.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Indoor air pollution – introduction for health professionals**, 1994. Disponível: <http://www.epa.gov/iaq/pubs>. Acesso em 20/01/2006.

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo / CIESP – Centro das Indústrias do Estado de São Paulo. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa**. São Paulo, 2001.

FISHER, J.R.; IANNOTTI, E.L.; PORTER, J.H.; GARCIA, A. **Producing methane gas from swine manure in a pilot-size digester**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 22, n. 2, p. 370-4, 1979.

FORESTI, E. **Microbiologia da Digestão Anaeróbia**. São Paulo, 1999.

GIACAGLIA, G.E.O., SILVA DIAS, S.F.D. **Parâmetros Técnicos Relativos à Tecnologia de Geração de Biogás em Biodigestores**. Boletim Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 1993.

HIRATA, Y.S.; CRAVEIRO, A.M., SOARES, H.M. **Aplicação de reatores de fluxo ascendente com leito de lodo (UASB) no tratamento de efluentes líquidos e produção de energia**. In: Simpósio Nacional sobre Fontes Novas e Renováveis de Energia, Anais.1. Brasília, 1986.

INFORME INFRA-ESTRUTURA. **Tratamento de Esgoto: Tecnologias Acessíveis**. Área de Projetos de Infra-Estrutura, nº 16. Novembro, 1997.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Summary for Policymakers**. A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC. Grupo 3. Shanghai, 2001.

IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas)/ CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem). **Lixo municipal – Manual de gerenciamento integrado**. 2ª. Edição, São Paulo, 2000.

JOHANSSON, T.B.; KELLY, H.; REDDY, A.K.N.; WILLIAMS, R.H. **Renewable energy sources for fuels and electricity**. 1160p. Island Press. Washington, 1993.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 3 ed., Rio de Janeiro, 1995.

JUNIOR, A. B. C. **Simulação do comportamento de um resíduos modelo em aterro sanitário e estudo da evolução bio-físico-química**/ INSA de Lyon – France, 2000.

LEMAIRE, F. C. & LEMAIER, E. **Dictionnaire de l'environnement**. Verviers, Marabout, 1975.

LETTINGA, G.; VAN VELSENA, A.F.M.; HOBMA, S.W.; DE ZEEUW, W.; KLAPWICK, A. **Use of up flow sludge blanket (UASB) reactor concept for biological waste water treatment, especially for anaerobic.** Biotechnol. Bioeng, v.22, p 699 – 734, 1980.

LEXMOND, M.J.; ZEEMAN, G. **Potential of controlled anaerobic wastewater treatment in order to reduce the global emissions of the greenhouse gases methane and carbon dioxide.** Rapportnr. 95-I Wageningen, Netherlands, 1995.

LIMA, F.P. **Energia no tratamento de esgoto: análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás.** Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. 139p. São Paulo, 2005.

LIMA-E-SILVA, P.P.; GUERRA, A.J.T.; MOUSINHO, P.; SOUZA JR., A.B. **Dicionário brasileiro de ciências ambientais.** 2. ed. Rio de Janeiro: Thex Ed., 2002.

LUCAS JÚNIOR, J. **Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substratos para três sistemas de biodigestores anaeróbios.** 137 p. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1994.

LUCAS JÚNIOR, J. **Estudo comparativo de biodigestores modelos Indiano e Chinês.** Tese de Doutorado. UNESP - Universidade Estadual Paulista, 114 p. Botucatu, 1987.

MONTEIRO, C. **Microturbinas, 2004. Produção e Transporte de Energia II.** LEEC – Faculdade de Engenharia da FEUP. Disponível: [http://paginas.fe.up.pt/~cdm/PTE2/PTE2\\_Microturbinas.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~cdm/PTE2/PTE2_Microturbinas.pdf). Acesso em 10/11/2005.

NETTO, J. C. **Gás natural liberalização do sector na União Europeia e em Portugal.** ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. Rio de Janeiro, 2004.

NOGUEIRA, L.A.H. **Biodigestão, a alternativa energética**. Editora Nobel, p.1-93. São Paulo, 1986.

PHILIPPI JR., A.; ROMÉRO, M.A.; BRUNA, G.C. **Curso de Gestão Ambiental**. Coleção Ambiental. Universidade de São Paulo – Faculdade de Saúde Pública, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Núcleo de Informações em Saúde Ambiental. Barueri, São Paulo: Manole, 2004.

PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico / IBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Número de distritos com tratamento de esgoto sanitário por tipo de sistema de tratamento**, 2000.

POMPERMAYER, R. S.; PAULA JR., D. R. **Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos**. Trabalho apresentado no Encontro de Energia no Meio Rural (AGRENER). Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade de Campinas (UNICAMP). Campinas, 2000.

PRONACI – Programa Nacional de Qualificação de Chefias Intermédias. **Ambiente e energia**. Ficha Técnica PRONACI. Câmara de Comércio e Indústria – Associação Empresarial de Portugal (AEP), 2002.

ROSS, C.C., DRAKE, T.J., **The handbook of biogas utilization**, U.S. Department of Energy Southeastern Regional Biomass Energy Program Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama, Second Edition, 1996.

SCHECHTMAN, R., CECCHI, S.C. **Projeto ambiental das hidrelétricas na Amazônia – impactos**, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.

SERVICE ENERGY. Disponível: <http://www.serviceenergy.com.br/apostila.pdf>. Acesso em 08/05/2005.

SILVA, N. A. **Manual técnico, construção e operação de biodigestor modelo chinês**. 2.ed. Editora EMATER, 90 p . Brasília, 1983.

SIRKIS, A.; TRIGUEIRO, A.; CAMARGO, A.; MINC, C.; VIOLA, E.; FELDMANN, F.; ALMEIDA, F.; GABEIRA, F.; CAPRA, F.; GIL, G.; CÂMARA, I.G.; CARVALHO, J.C.; VEIGA, J.E.; GOLDEMBERG, J.; BOFF, L.; DUARTE, M.; NALINI, R.; BORN, R.H.; CRESPO, S.; BESSERMAN, S.; NOVAES, W. **Meio ambiente no século 21: 21 especialistas falam da questão ambiental nas suas áreas de conhecimento.** Coordenação de André Trigueiro. Rio de Janeiro: Sextante, 2003.

SOLAR TURBINES – Caterpillar Company. Disponível: <http://mysolar.cat.com>. Acesso em: 25/04/2005.

SOUZA, M.E. **Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia.** Trabalho apresentado no V Simpósio Nacional de Fermentação, Viçosa, 1982.

SOUZA S.N.M.; PEREIRA, W.C.; NOGUEIRA, C.E.C; PAVAN, A.A.; SORDI, A. **Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura.** Maringá, 2004.

TOMMASI, L.R. **Estudo de impacto ambiental.** CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, 1994.

VAN HAANDEL, A. C. **Influence of the digested cod concentration on the alkalinity requirement in anaerobic digesters.** Water Science Tech. Campina Grande, 1994.

VAN HAANDEL, A. C., Lettinga, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente.** Epgraf. 240 p. Campina Grande, 1994.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNACKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica.** Tradução da 4ª edição americana, 1995. 589 p.

VIEIRA, S.M.M.; SOUZA, M.E.; CARVALHO, J.L. **Tratamento de esgotos por digestão anaeróbia**. Revista Ambiente, v. 1, n.3, p. 132-137, 1987.

VIEIRA, S.M.M.; AUGUSTO, A.C.; MIDAGLIA, C.L.V. **Banco de dados de locais de tratamento anaeróbio de resíduos no Brasil**. Inventário Nacional de Emissões de Metano Gerado pelos Resíduos no Brasil. Relatório de Atividades do Projeto Bra/95/G31, CETESB. 145 p. São Paulo, 1998.

VILLEN, R.A.; LIMA, U.A; AQUURONE, E; BORZANI, W.; SCHIMIDELL, W. **Tratamento biológico de efluentes**. Biotecnologia Industrial. Vol. 3. São Paulo. Editora Edgar Blucher. 2001. p. 513-546.

VITORATTO, E. **Tratamento de efluentes líquidos orgânicos – sistemas anaeróbios**. Proacqua Processos de Tratamento de Efluentes e Com. Ltda. Faculdade Oswaldo Cruz, São Paulo, 2004.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA, Universidade Federal de Minas Gerais. Volume 1. 240 p. Minas Gerais, 1995.

WEREKO-BROBBY, C. Y., HAGEN, E.B. **Biomass conversion and technology**. Editora John Wiley & Sons. p. 2-224. New York, 2000.

WYLEN; V. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. Tradução da 4ª edição americana, 1995.

YAMASHITA, T. **Certificado de Análise dos Gases de Exaustão – PUREFA**. Relatório de Ensaio - WHITE MARTINS. São Paulo, 2004.

YAMASHITA, T. **Certificado de Análise dos Gases de Exaustão – PUREFA**. Relatório de Ensaio - WHITE MARTINS. São Paulo, 2005.

**ANEXO A**

***FLUXO DE CAIXA DO PROJETO ENERG-BIOG***

**FLUXO DE CAIXA DO GRUPO GERADOR DE 30 kW**

Semestre	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>ENTRADAS</b>										
Receitas com energia		17,520.00	17,520.00	17,520.00	17,520.00	17,520.00	17,520.00	17,520.00	17,520.00	17,520.00
<b>INVESTIMENTO INICIAL (CAPEX)</b>										
Total investido	(24,680.00)		(8,226.67)	(8,226.67)	(8,226.67)	(8,226.67)	(8,226.67)	(8,226.67)	(8,226.67)	(8,226.67)
<b>SAÍDAS OPERACIONAIS</b>										
O&M		(3,022.22)	(3,022.22)	(3,022.22)	(3,022.22)	(3,022.22)	(3,022.22)	(3,022.22)	(3,022.22)	(3,022.22)
<b>FLUXO DE CAIXA LIVRE</b>	(24,680.00)	14,497.78	6,271.11	6,271.11	6,271.11	6,271.11	6,271.11	6,271.11	6,271.11	6,271.11

**FLUXO DE CAIXA DA MICROTURBINA DE 30 kW**

Semestre	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>ENTRADAS</b>										
Receitas com energia		13,665.60	13,665.60	13,665.60	13,665.60	13,665.60	13,665.60	13,665.60	13,665.60	13,665.60
<b>INVESTIMENTO INICIAL (CAPEX)</b>										
Total investido	(151,046.40)									
<b>SAÍDAS OPERACIONAIS</b>										
O&M		(15,731.72)	(15,731.72)	(15,731.72)	(15,731.72)	(15,731.72)	(15,731.72)	(15,731.72)	(15,731.72)	(15,731.72)
<b>FLUXO DE CAIXA LIVRE</b>	(151,046.40)	(2,066.12)	(2,066.12)	(2,066.12)	(2,066.12)	(2,066.12)	(2,066.12)	(2,066.12)	(2,066.12)	(2,066.12)

AVALIAÇÃO	
PROJETO MICROTURBINA	PROJETO GERADOR
VPL (R\$ 166,930.39)	VPL R\$ 80,857.18
Taxa Benchmark	
13.75%	ao ano
3.27%	ao semestre

Por que descontar à 18,72% ?

Utiliza-se como base para essa taxa de desconto a remuneração de um título publico brasileiro (15,75% lastreado pela SELIC) + um spread de 3% pelos riscos inerentes a esse projeto. Normalmente, no segmento energético, essa é a taxa requerida de retorno para a inversão de capital em projetos com essas características (novo e de escala pequena).