



FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS APLICAVEIS À BIOENERGIA

NEILA SANTANA DOS SANTOS

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO NA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DE MADRE DE DEUS - BAHIA**

Salvador - 2009

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DE MADRE DE DEUS - BAHIA

NEILA SANTANA DOS SANTOS

Dissertação apresentada como pré-requisito para à
obtenção do título de Mestre Profissional em
Tecnologias Aplicáveis à Bioenergia do Curso de
Mestrado Profissional Tecnologias Aplicáveis à
Bioenergia da Faculdade de Tecnologia e Ciências
de Salvador

Orientador: Prof. Dr. Humberto Santos Filho

SALVADOR – 2009

FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS APLICÁVEIS À
BIOENERGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,

APROVA o Trabalho Final de Mestrado

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO NA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DE MADRE DE DEUS - BAHIA

NEILA SANTANA DOS SANTOS

Como requisito final para a obtenção do Grau de MESTRE PROFISSIONAL em
TECNOLOGIAS APLICÁVEIS À BIOENERGIA

COMISSÃO EXAMINADORA

Humberto Santos Filho _____
Doutorado em Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Brasil,
2004.

Eduardo Henrique Borges Cohim Silva _____
Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo,
Universidade Federal da Bahia, UFBA, Brasil, 2006.

Júlio César Rocha Mota _____
Mestrado em Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, UNB, Brasil, 2008.

Salvador-BA, 17 de dezembro de 2009

DEDICATÓRIA

À minha avó Dezinha (*in memorian*), expressão sublime do amor.

À minha mãe, visionária, que transpôs todos os obstáculos para garantir a minha educação, não se conformando com o que estava ao alcance, mas buscando sempre o melhor, por vezes à custa de sacrifícios e abdições.

Aos amigos Bianca, Eduardo, Cleo e Rúbia por me fazerem sorrir com a alma.

Aos amigos Paulo e Beatriz presentes da vida nesta e em muitas jornadas.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo milagre da vida e possibilidade de sempre fazer escolhas.

À Faculdade de Tecnologia e Ciências pela oportunidade a mim oferecida.

À Prof^ª. Iracema Nascimento pela concretização do Mestrado e intervenção em momentos oportunos para que este trabalho se tornasse realidade.

Ao Prof. Humberto Santos Filho, orientador, por estimular minhas potencialidades possibilitando o crescimento profissional.

Ao Prof. Eduardo Cohim, co-orientador, pela dedicação, paciência e maestria na condução da orientação.

Ao Prof. Júlio Mota pela disponibilidade, apoio e fornecimento dos dados essenciais à conclusão da pesquisa.

À incentivadora Prof^ª. Leriane Cardozo por acreditar nesta realização antes mesmo de mim.

À Prof^ª. Rosemary Ramos pelo acolhimento e palavras que nos momentos mais adversos sustentaram minha motivação.

Ao amigo Rafael com quem desde o início partilhei conhecimento e angústias.

Aos amigos Fred e Léa cuja companhia suavizou a caminhada, por vezes difícil.

Ao amigo Rolf por provocar a centelha que, mais tarde, nos tornaria Mestres.

A todos que, de alguma forma, prestaram seu apoio.

RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade avaliar a viabilidade econômica de aproveitamento do potencial energético do biogás produzido na Estação de Tratamento de Efluentes - ETE de Madre de Deus para geração de energia elétrica. Seus objetivos específicos consistem em identificar o potencial energético dos esgotos afluentes à ETE de Madre de Deus, selecionar a tecnologia de conversão, realizar levantamento dos custos de investimento e manutenção do equipamento, avaliar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na ETE e analisar os benefícios econômicos e ambientais envolvidos. Os resultados revelaram que à probabilidade de 50% o potencial elétrico gerado por 461m³/dia de biogás na ETE de Madre de Deus equivale a aproximadamente 37KW. O tempo de recuperação do capital ou *payback* será atingido em 2,3 anos, viável para o tempo de vida útil do equipamento de quatro anos. A relação B/C para o valor presente encontrado é igual a 3,55 e a TIR de 61,7% ao ano supera a taxa de juros praticada de 12%. Logo, comprova-se a viabilidade econômica do investimento para todos os indicadores analisados.

Palavras-chave: Biogás. Biomassa. Eficiência Energética. Saneamento. Viabilidade Econômica

ABSTRACT

This study aims to assess the economic viability of exploiting the energy potential of biogas in the Sewage Treatment of Madre de Deus for power generation. Its specific objectives are to identify the energy potential of sewage inflows to the Sewage Treatment of Madre de Deus, select the conversion technology, carry out a survey of investment costs and maintenance of equipment, evaluate the economic viability of generating electricity from biogas sewage treatment and analyze the economic and environmental benefits involved. The results showed that the 50% probability of the electric potential generated by 461m³ / day of biogas in Sewage Treatment of Madre de Deus is equivalent to approximately 37KW. The recovery time or the capital payback is achieved in 2.3 years, viable for the life cycle of the equipment of four years. The ratio B/C for the present value is found equal to 3.55 and ROI of 61.7% per annum rate exceeds the rate of interest of 12%. Therefore, it was proven the economic viability of investment for all indicators.

Keywords: Efficiency. Biomass. Biogas. Sanitation. Economic Viability

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Gráfico da Oferta Interna de Energia	18
Figura 02 – Gráfico da Matriz Energética Brasileira e Mundial – por fonte	18
Figura 03 – Gráfico da Matriz de Consumo Brasileira e Mundial – por setor	21
Figura 04 – Fontes de Energia Renováveis	24
Figura 05 – Fases do Processo de Digestão Anaeróbia	26
Figura 06 – Desenho esquemático de um reator UASB	31
Figura 07 – Modelo de gerador a biogás	48
Figura 08 – Gráfico de distribuição do potencial elétrico por frequência acumulada	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Oferta Interna de Energia no Brasil, 2007 – 2008	19
Tabela 02 – Matriz de Consumo Final de Energia no Brasil – por fonte, 2007 – 2008	20
Tabela 03 – Matriz de Oferta de Energia Elétrica – Mundo/Brasil, 2006/2008	21
Tabela 04 – Matriz de Consumo Final de Energia Elétrica no Brasil – por setor, 2007 – 2008	22
Tabela 05 – Consumo Anual de Energia Elétrica no Setor de Saneamento, Brasil, 2007 ..	22
Tabela 06 – Valores de entrada para cálculo da produção de biogás	46
Tabela 07 – Variáveis de entrada para o Método de Monte Carlo	53
Tabela 08 – Variáveis de saída pelo Método de Monte Carlo em distribuição de frequência acumulada	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Comparativo Fontes Fósseis x Fontes Renováveis	23
Quadro 02 – Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás	25
Quadro 03 – Equivalência energética de 1m ³ de biogás	26
Quadro 04 – Dados operacionais da Embasa em 2007	39
Quadro 05 – Especificações Técnicas do Grupo Gerador Fockink SG-75B	49
Quadro 06 – Custo de implantação do grupo gerador Fockink - 62KW	50
Quadro 07 – Custos de Operação e Manutenção - O&M	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

B/C	Relação Benefício/Custo
C	Carbono
Cenbio	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CFC	Clorofluorcarboneto
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Gás Carbônico
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Embasa	Empresa Baiana de Águas e Saneamento S/A
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FVP	Fator de Valor Presente
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Gás sulfídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MME	Ministério de Minas e Energia
N	Nitrogênio
N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
O&M	Operação e Manutenção
O ₂	Oxigênio
OECD	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OMS	Organização Mundial de Saúde
PCI	Poder Calorífico Inferior
pH	Índice de Acidez
Proálcool	Programa Nacional do Alcool
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SIMB	SIG
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
TIR	Taxa Interna de Retorno
TRC	Tempo de Retorno do Capital
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UASB	Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE QUADROS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xi
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	15
1.2. MÉTODO DA PESQUISA	15
1.3. ESTRUTURA	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1. A QUESTÃO ENERGÉTICA.....	17
2.1.1. A Biomassa como Fonte Alternativa de Energia	23
2.2. BIOGÁS.....	24
2.2.1. Digestão Anaeróbia	26
2.2.2. Reatores Anaeróbios	29
2.2.3. Produção de Biogás a Partir de Esgotos Domésticos.....	32
2.3. APLICAÇÃO DO BIOGÁS NA OBTENÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	34
2.3.1. Tecnologias de Conversão.....	35
2.4. SANEAMENTO, SUSTENTABILIDADE E ENERGIA	36
2.4.1. Situação Atual do Saneamento no Brasil	37
2.5. ASPECTO AMBIENTAL.....	38
2.5.1. Protocolo de Quioto	39

2.5.2. Método IPCC para Estimativas de Emissões dos Esgotos.....	40
2.6. ASPECTO ECONÔMICO	41
3. MATERIAL E MÉTODOS	42
3.1. ESTUDO DE CASO NA ETE DE MADRE DE DEUS	42
3.2. PRODUÇÃO DE BIOGÁS	43
3.3. POTENCIAL ELÉTRICO DO BIOGÁS.....	47
3.4. MÉTODO DE MONTE CARLO PARA CÁLCULO DO POTENCIAL ELÉTRICO	47
3.5. EQUIPAMENTO DE CONVERSÃO	48
3.5.1. Especificações Técnicas.....	48
3.5.2. Custos de Investimento, Manutenção e Operação.....	50
3.6. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA	51
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
4.1. POTENCIAL ELÉTRICO DO BIOGÁS GERADO NA ETE DE MADRE DE DEUS	53
4.2. ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	55
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	57
REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

No contexto histórico a energia sempre atuou como fator preponderante no desenvolvimento das civilizações. O processo de urbanização favoreceu o consumo predatório dos recursos naturais potencializado pela busca por novas fontes energéticas capazes de sustentar o estilo de vida emergente. Inicialmente, o carvão mineral destacou-se como o primeiro combustível fóssil introduzido na matriz energética, à época da Revolução Industrial, até a hegemonia petróleo no final do século XIX (DIAS, 2007).

A predominância dos combustíveis fósseis levou o mundo ao crescimento econômico e mudanças no estilo de vida das civilizações, sobretudo as grandes consumidoras de energia. Todavia, a perspectiva de desabastecimento e instabilidade nos preços estimularam a busca por fontes energéticas alternativas (LEITE; LEAL, 2007).

Os problemas ambientais causados pelo consumo negligente dos recursos naturais, emissões de gases causadores do efeito estufa e contaminações do solo e mananciais reforçaram a necessidade de substituição das fontes de carbono por energia alternativa, de forma limpa e sustentável (JR.; AGUIAR, 2005).

O biogás, subproduto de processos que envolvem a digestão da matéria orgânica oriunda de biomassa, possui potencial energético ao mesmo tempo em que agrava o efeito estufa se lançado na atmosfera pela predominância de CH₄ na sua composição (ALVES, 2000). Constitui-se em uma alternativa de energia renovável para o País, já que contribui com a melhoria do balanço energético dos sistemas de esgotamento sanitário (CENBIO, 2009).

Uma possível utilização do biogás é na obtenção de energia elétrica. De acordo com o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto referente a 2007, a energia elétrica no setor de saneamento correspondeu a 2% do total consumido no país (SNIS, 2009).

Na Bahia, o serviço de esgotamento sanitário abrange apenas 13% das sedes municipais do Estado, dentre estas, o município de Madre de Deus, objeto deste estudo, cuja população prevista para o final da vida útil do projeto relativo ao serviço de esgotamento sanitário é de 28.932 habitantes. O sistema de tratamento está projetado para funcionar em reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo tipo UASB¹ servidos por tratamento aeróbio em lodo ativado e desinfecção com ultravioleta antes do lançamento no mar (EMBASA, 2009).

¹ *Upflow anaerobic sludge blanked*

Em face dos aspectos econômicos e ambientais que envolvem o saneamento básico, formula-se o seguinte problema de pesquisa: **é viável economicamente o aproveitamento do biogás produzido na Estação de Tratamento de Esgoto de Madre de Deus para a geração de energia elétrica?**

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é **avaliar a viabilidade econômica de aproveitamento do potencial energético do biogás produzido na ETE de Madre de Deus para geração de energia elétrica.**

Para consecução do objetivo geral foram propostos os objetivos específicos a seguir:

- Identificar o potencial energético dos esgotos afluentes à ETE de Madre de Deus;
- Selecionar a tecnologia de conversão;
- Realizar levantamento dos custos de investimento e manutenção do equipamento;
- Avaliar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na ETE;
- Analisar os benefícios econômicos e ambientais envolvidos.

1.2. MÉTODO DA PESQUISA

De acordo com Gil (2002), a pesquisa classifica-se em Exploratória, já se dedica ao estudo de tema no qual ainda não existem muitos trabalhos publicados.

Quanto ao delineamento, optou-se pelo Estudo de Caso haja vista que a pesquisa, pela complexidade de generalização da análise, está fundamentada em um único modelo, entretanto, possibilita a projeção e aplicação prática dos resultados (GIL, 2000).

1.3. ESTRUTURA

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos:

No Capítulo 1 ocorre a introdução do trabalho, abrangendo a justificativa, o problema proposto, os objetivos geral e específicos e a classificação da pesquisa.

O Capítulo 2 constitui-se em referencial teórico onde a questão energética é retratada de forma ampla, estabelecendo um comparativo entre a participação das energias renováveis e fósseis no Brasil e no mundo, salientando o uso da biomassa enquanto fonte alternativa. Ainda nesta sessão são abordados os tópicos relacionados ao estudo do biogás gerado em estações de tratamento de esgoto, discorrendo sobre os aspectos ambientais e econômicos envolvidos.

A metodologia aplicada para elucidar as questões levantadas na pesquisa é apresentada no Capítulo 3, assim como os custos envolvidos, permitindo uma análise conclusiva da viabilidade do projeto.

A discussão dos resultados obtidos acerca do potencial energético do biogás proveniente das estações de tratamento de esgoto e a viabilidade econômica de aplicação desse gás na geração de energia elétrica são evidenciados no Capítulo 4.

Já o Capítulo 5 conclui o trabalho com as considerações finais e recomendações no intuito de contribuir com a eficiência energética no saneamento.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo contextualiza a questão energética, destacando a importância da biomassa enquanto fonte de energia alternativa, limpa e renovável. Apresenta os mecanismos para obtenção do biogás e aplicação na geração de energia elétrica, abordando os impactos econômicos e ambientais desta fonte no setor de saneamento.

2.1. A QUESTÃO ENERGÉTICA

Nas sociedades primitivas não havia custo no uso da energia. Fontes rudimentares como lenha extraída de florestas eram utilizadas para cozimento e aquecimento em escala doméstica (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Com a urbanização, o consumo dos recursos naturais foi intensificado, associando o uso da biomassa à devastação, miséria e subdesenvolvimento (CENBIO, 2007). No século XVIII, a Revolução Industrial aumentou exponencialmente a demanda por energia e foi responsável pelo surgimento do carvão mineral na matriz energética, dando início ao consumo de combustíveis fósseis, potencializado com a inserção do petróleo no final do século XIX (DIAS, 2007).

O interesse por fontes alternativas de energia surgiu, efetivamente, após o primeiro choque do petróleo na década de 70 do século XX. A volatilidade nos preços e a perspectiva de desabastecimento foram o que em um primeiro momento despertaram no mundo a necessidade de substituição dos combustíveis fósseis (LEITE; LEAL, 2007). Tais fatores, associados ao aumento da poluição e do efeito estufa, legislações ambientais mais restritivas e pressão da sociedade pela sustentabilidade dos recursos naturais foram decisivos para a consolidação da bioenergia. A indústria de bioenergia distingue-se pela utilização de fontes alternativas renováveis como *input* na cadeia produtiva, destacando-se a biomassa (ÁVILA, 2007).

De acordo com a Resenha Energética Brasileira, em 2006 as fontes renováveis representavam 12,9% da matriz energética mundial (Figura 01), sendo 10,7% do fornecimento proveniente de biomassa e 2,2% hidráulica. Das fontes não renováveis, o petróleo mantém-se em destaque com 34,5%, seguido do carvão mineral e energia nuclear com 26% e 6,2%, respectivamente. Analisando somente os países da Organização para

Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD²), a oferta de energia renovável retrai-se para 6,7%, conforme mostrado na Figura 02 (MME, 2009).

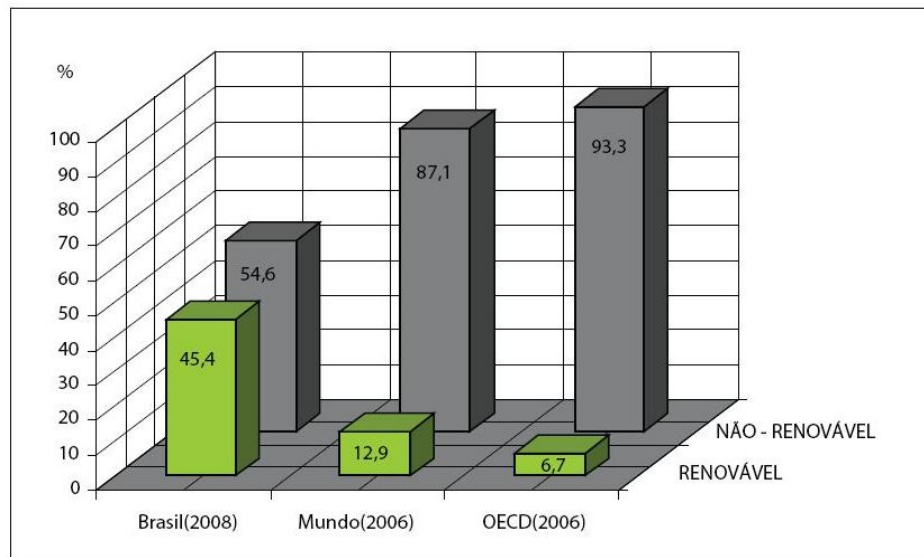


Figura 01 – Gráfico da Oferta Interna de Energia

Fonte: MME, 2009

Superando a média mundial, o Brasil destacou-se na produção de energia renovável com 45,4% (Figura 01), sobretudo pela utilização de biomassa, 31,5%, e energia hidráulica, 13,9%. Acompanhando o cenário mundial, o petróleo se sobressai com 37,3% e os demais componentes não renováveis da matriz energética nacional com 17,4%, conforme mostra a Figura 02.

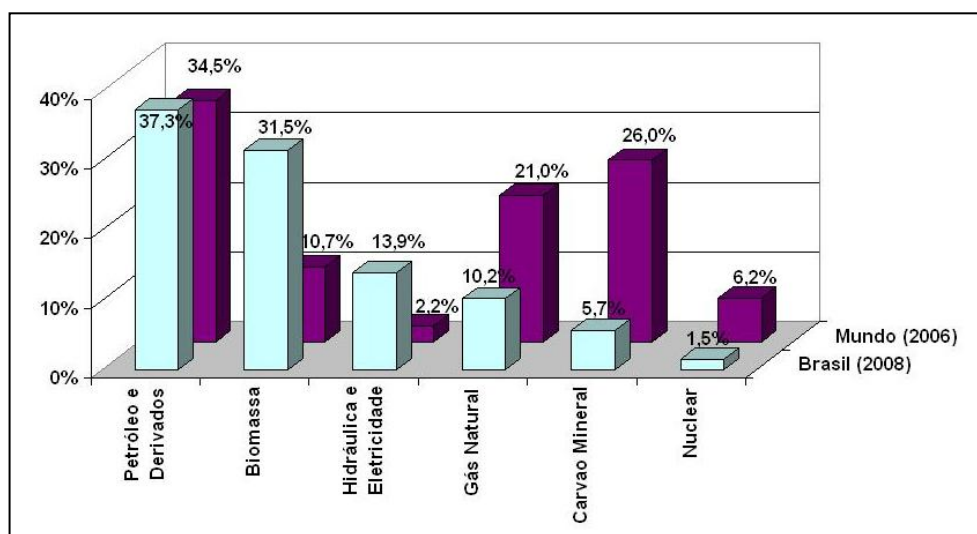


Figura 02 – Gráfico da Matriz Energética Brasileira e Mundial – por fonte

Fonte: Adaptado MME, 2009

² Integra os países mais industrializados da economia do mercado, atualmente composta por 30 membros. Fonte: <<http://www.cgu.gov.br/ocde/sobre/index.asp>>.

Analisando a Tabela 01 observa-se que em 2008 houve um crescimento de 5,3% na oferta total de energia do país em relação a 2007, correspondendo a 251,5 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (TEP³) no ano, tornando o Brasil responsável por 2% da oferta interna de energia no mundo, ou seja, 11 741 milhões de TEP. Mesmo no cenário de crescimento houve uma queda de 0,5% no uso das fontes renováveis, sobretudo em razão da expansão do gás natural, passando de 3,7% em 1998 para 10,2% em 2008. Neste ano, o principal fator de crescimento esteve no uso do combustível para geração de energia elétrica.

O Brasil, por apresentar extensa faixa territorial com irradiação solar constante e excelentes condições edafoclimáticas é o país da biomassa por excelência (COUTO et al., 2004). Foi o pioneiro na utilização em larga escala para produção de energia com a regulamentação do Programa Nacional do Alcool - Proálcool, em 1975, estimulando o uso do etanol como combustível automotivo, o que elevou a biomassa a insumo energético de grande importância (CENBIO, 2007), atualmente ocupando o 2º lugar na matriz brasileira, conforme representado na Tabela 01 (MME, 2009).

Tabela 01 – Oferta Interna de Energia no Brasil, 2007 - 2008

Fontes	OIE (mil TEP)		%		
	2007	2008	2007	2008	
1º	Petróleo e Derivados	89.239	93.711	37,4	37,3
2º	Biomassa	74.151	79.180	31,1	31,5
3º	Hidráulica e Eletricidade	35.505	35.013	14,9	13,9
4º	Gás Natural	22.199	25.625	9,3	10,2
5º	Carvão Mineral	14.356	14.294	6,0	5,7
6º	Urânio	3.309	3.703	1,4	1,5
TOTAL		238.758	251.526	100,0	100,0
Não-renovável		129.103	137.333	54,1	54,6
Renovável		109.656	114.193	45,9	45,4

Fonte: Adaptado MME, 2009

Embora a oferta total de energia em 2008 tenha crescido 5,3%, o consumo final registrou um incremento de 4,5%, (Tabela 02) atingindo o patamar de 225,2 milhões de TEP,

³ Unidade de medida de energia correspondente à quantidade de calor existente em 1 tonelada de petróleo que, por convenção, é igual a 10.000 Mcal. Fonte: <<http://www.anp.gov.br/glossario/index.asp>>. Os cálculos dos valores em TEP baseiam-se na equivalência de 1 TEP = 10.000 Mcal e 1 kWh = 860 kcal = 0,086 TEP e as equivalências entre os diversos tipos de energia tomam como base o poder calorífico inferior (PCI). Fonte: <http://ecen.com/eee63/eee63p/programa%20bal_eec%20-manual%20do%20usuario.htm#_ftn1>.

devido às perdas ocasionadas nas Centrais de Serviço Público pelo aumento da geração térmica (MME, 2009).

No mundo, as fontes renováveis atuam em 20% do consumo global de energia, sendo a biomassa responsável por 14% e hidroenergia 6% (COUTO e MÜLLER, 2008). Acompanhando o desempenho da oferta, o Brasil sobrepõe o consumo de biomassa mundial, que junto à eletricidade posiciona as fontes renováveis com 46,2% na matriz de consumo, como mostra a Tabela 02. Nota-se que em relação a 2007 o consumo de biomassa aumentou 6,2% principalmente pelo uso térmico do bagaço na indústria sucroalcooleira (MME, 2009).

Tabela 02 – Matriz de Consumo Final de Energia no Brasil – por fonte, 2007 - 2008

Fontes	mil TEP		%	
	2007	2008	2008	08/07
1° Petróleo e Derivados	89.331	93.074	41,3	4,2
2° Biomassa	63.238	67.173	29,8	6,2
3° Eletricidade	35.443	36.958	16,4	4,3
4° Gás Natural	15.502	16.076	7,1	3,7
5° Carvão Mineral	12.050	11.966	5,3	-0,7
TOTAL	215.565	225.247	100,0	4,5
Não-renovável	116.883	121.116	53,8	3,62
Renovável	98.681	104.131	46,2	5,52

Fonte: MME, 2009

A maior participação energética no Setor Industrial brasileiro em relação ao mundo deve-se à presença significativa das indústrias de base – *commodities*, característica dos países em desenvolvimento, enquanto que nos países desenvolvidos o consumo é maior em “outros setores” cuja qualidade de vida afeta diretamente a demanda por energia, como mostra a Figura 03 (MME, 2009).

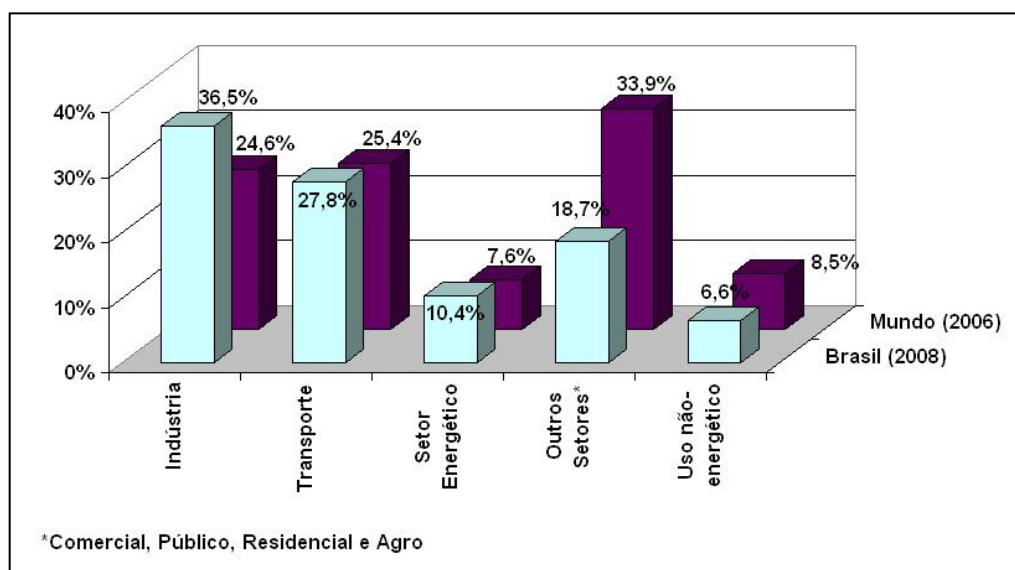


Figura 03 – Gráfico da Matriz de Consumo Brasileira e Mundial – por setor
Fonte: Adaptado MME, 2009

No que tange à produção de energia elétrica, a biomassa é responsável por 4,8% do total ofertado no país, em torno de 503,5TWh, superada apenas pela geração hidráulica, com 72,5%, e a gás natural, 5,9%, se desconsiderada a importação no *ranking*, conforme Tabela 03 (MME, 2009).

Tabela 03 – Matriz de Oferta de Energia Elétrica – Mundo/Brasil, 2006/2008

Fontes	TWh		%	
	Brasil (2008)	Mundo (2006)	Brasil (2008)	Mundo (2006)
1º Hidráulica	365,1	3.028,8	72,5	16,0
2º Importação	42,1	-	8,4	-
3º Gás Natural	29,6	3.804,9	5,9	20,1
4º Biomassa	24,4	-	4,8	-
5º Derivados de Petróleo	15,6	1.097,9	3,1	5,8
6º Nuclear	14,0	2.801,6	2,8	14,8
7º Carvão Mineral	8,2	7.761,4	1,6	41,0
8º Gás Industrial	4,6	-	0,9	-
9º Outras	-	435,4	-	2,3
TOTAL	503,5	18.930	100,0	100,0

Fonte: Adaptado MME, 2009

Pela predominância do carvão mineral e participação inexpressiva da biomassa e recursos hídricos na matriz de energia elétrica mundial, comparativamente à matriz brasileira,

as fontes renováveis são responsáveis por apenas 18% da oferta de energia elétrica no mundo, enquanto que o Brasil possui 81% da sua produção oriunda de tais fontes (MME, 2009).

Já o consumo é obtido subtraindo da oferta as perdas na distribuição, que em 2008 representaram 13%, ou seja, 73,8TWh. Dessa forma, o consumo final de energia elétrica em 2008 no país foi de 429,7TWh. Quando comparado a 2007, houve um incremento de 4,3%. A distribuição setorial do consumo encontra-se na Tabela 04 a seguir (MME, 2009).

Tabela 04 – Matriz de Consumo Final de Energia Elétrica no Brasil – por setor, 2007 - 2008

Fontes	TWh		%	
	2007	2008	2008	08/07
1° Industrial	192,6	199,9	46,5	3,8
2° Comercial e Público	92,3	97,2	22,6	5,4
3° Residencial	90,9	94,7	22,0	4,2
4° Outros	36,4	38,0	8,8	4,5
TOTAL	412,1	429,7	100,0	4,5

Fonte: MME, 2009

De acordo com o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto, em 2007 o consumo de energia elétrica no setor de saneamento representa 2% de todo o consumo nacional, ou seja, mais de 10,3TWh/ano, segundo dados consolidados na Tabela 05 (SNIS, 2009), apresentando-se como o segundo item de despesas no setor de saneamento, perdendo apenas para a despesa com pessoal (GOMES, 2005).

Tabela 05 – Consumo Anual de Energia Elétrica no Setor de Saneamento, Brasil, 2007

Prestadores de Serviço/Abrangência	Água	Esgoto
	TWh	TWh
Regional	7,05	0,56
Microrregional	0,06	0,01
Local - Direito Público	1,93	0,13
Local - Direito Privado com Administração Pública	0,26	0,02
Local - Empresa Privada com Administração Privada	0,31	0,02
SUBTOTAL	9,61	0,73
TOTAL CONSUMO ANUAL	10,34	

Fonte: SNIS, 2009

2.1.1. A Biomassa como Fonte Alternativa de Energia

Projeções do *Institute for International Economics* apontam que a demanda por energia no mundo aumentará 1,7%, considerando os períodos de 2000 a 2030, chegando a 15,3 bilhões de TEP. O mesmo estudo indica que 90% deste aumento serão motivados pelos combustíveis fósseis (EMBRAPA, 2003).

As fontes de carbono dominam a matriz energética mundial, entretanto, o preço internacional do petróleo em constante instabilidade e historicamente em ascensão despertou no mundo a necessidade de fomento às fontes alternativas de energia. A perspectiva de exaustão das reservas fósseis, não renováveis, haja vista o aumento do consumo em escala exponencial levou à produção comercial dos bicompostíveis no mundo (LEITE e LEAL, 2007).

Diferente das fontes não renováveis tradicionais, as renováveis possuem baixa emissão de gases efeito estufa e coadunam com a sustentabilidade. Em contrapartida, enfrentam o desafio de tornarem-se competitivas em relação às atuais desvantagens, conforme quadro comparativo a seguir (EMBRAPA, 2006).

	FONTES FÓSSEIS	FONTES RENOVÁVEIS
VANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Custos competitivos ▪ Alta densidade energética ▪ Tecnologia de ponta largamente dominada ▪ Veículos, máquinas e equipamentos adaptados ao uso ▪ Ganho econômico de escala ▪ Mercado consolidado 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baixas emissões de gases de efeito estufa ▪ Sustentabilidade ▪ Produção próxima ao mercado consumidor ▪ Perspectiva de geração de emprego e renda com o crescimento da agroenergia
DESADVANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta emissão de gases de efeito estufa ▪ Potencial poluidor ambiental em grandes proporções ▪ Preços voláteis e em ascensão ▪ Perspectiva de esgotamento das reservas ▪ Jazidas concentradas geograficamente ▪ Fortemente influenciado por fatores geopolíticos ▪ Produto cartelizado 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Custos altos ▪ Baixa combustibilidade ▪ Tecnologia em desenvolvimento ▪ Produção intermitente ▪ Consumo instável ▪ Sem ganho de escala ▪ Opções de financiamento limitadas ▪ Necessidade de áreas para agricultura energética competindo com a ocupação da terra para produção de alimentos, moradia, lazer e urbanização

Quadro 01 – Comparativo Fontes Fósseis x Fontes Renováveis

Fonte: Adaptado EMBRAPA, 2006

Dentre as fontes renováveis existentes, mostradas na Figura 04, a biomassa destaca-se pelo uso crescente como vetor energético moderno associado a tecnologias de conversão sofisticadas e aplicação comercial (CENBIO, 2007). Constitui-se em matéria orgânica de origem animal ou vegetal com potencial para produção de energia que poderá ser transformada em combustível, calor ou eletricidade (COUTO et al., 2004).

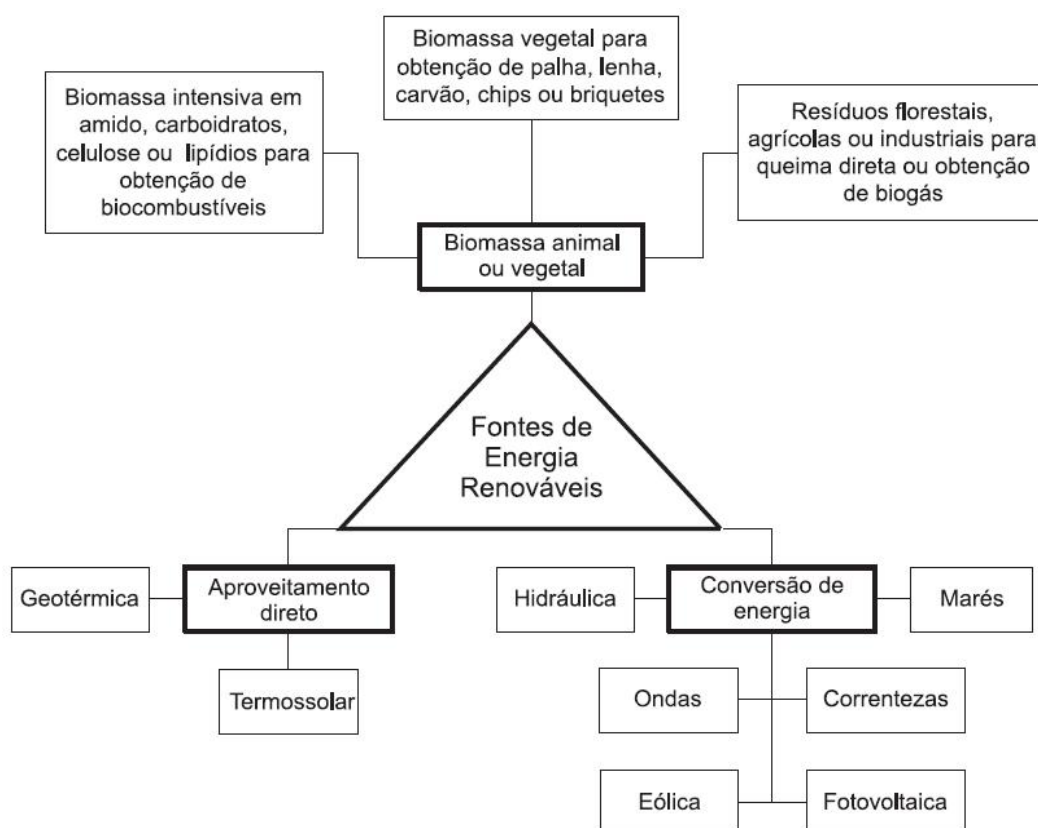


Figura 04 – Fontes de Energia Renováveis

Fonte: EMBRAPA, 2006

2.2. BIOGÁS

O biogás - também conhecido como gás dos pântanos - constitui-se em uma fonte de energia limpa obtida a partir da decomposição da fração orgânica da biomassa pela ação de bactérias em ambiente anaeróbio (ANDREOLI et al., 2003). Os resíduos comumente usados para a obtenção do biogás são dejetos humanos e animais, lama de esgoto e resíduos vegetais de colheita, que são nutrientes ricos apropriados para o crescimento das bactérias anaeróbias. A composição do biogás poderá variar em função de fatores como tipo de digestor, substrato e

tempo de retenção, entretanto, poderá ser adotada a proporção a seguir para os gases que constituem a mistura (SASSE; POLPRASERT, 1998, 2007):

- Metano (CH₄) 55 a 75%
- Gás carbônico (CO₂) 25 a 45%
- Outros gases: 1 a 5%, divididos em:
 - Hidrogênio (H₂) 0 a 1% vol.
 - Gás sulfídrico (H₂S) 0 a 1% vol.
 - Oxigênio (O₂) + Nitrogênio (N₂) 0 a 1% vol.

A decomposição da biomassa é responsável por 90% das emissões de metano na atmosfera (SASSE, 1998), sendo 7% provocadas pelo tratamento de esgotos (ANDREOLI et al., 2003). O CH₄ lançado diretamente provoca efeito estufa 21 vezes maior do que o CO₂ (ALVES, 2000).

Segundo Sasse (1998), a partir de 1kg de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) pode-se obter 0,35m³ de CH₄. O potencial de combustão do biogás está associado diretamente à presença do metano pelo seu alto poder calorífico (POLPRASERT, 2007). O Quadro 2 a seguir apresenta a variação do poder calorífico do biogás em relação às proporções de CH₄ e CO₂ existentes no composto (COSTA, 2006).

Composição Química do Biogás	Peso Específico	Poder Calorífico Inferior
	(Kg/Nm ³)	(kcal/kg)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43
50% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01
95% CH ₄ , 05% CO ₂	0,7768	10.469,60
99% CH ₄ , 01% CO ₂	0,7268	11.661,02

Quadro 02 – Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás
Fonte: Avellar, 2001 apud Costa, 2006

Diferentemente do propano e butano, o biogás possui baixa densidade - menor que o ar atmosférico - o que dificulta sua acumulação e liquefação, além de ocupar grandes volumes. Em termos logísticos encontra-se em desvantagem, no entanto, a baixa densidade o

torna menos suscetível à explosão (PIEROBON, 2007). O baixo teor de CO na mistura (inferior a 0,1%) confere ao biogás um nível de toxicidade zero enquanto que o gás de cidade, por exemplo, com níveis de CO em torno de 20% é considerado letal (CORTEZ, et al., 2008). Deve-se à presença de H₂S o potencial corrosivo do biogás, implicando em cuidados especiais aos equipamentos (COSTA, 2006).

A equivalência energética de 1m³ de biogás em relação a outras fontes está representado no Quadro 03 (LINDEMEYER, 2008, p.35):

Combustível	Quantidades equivalentes
Carvão	1,5 m ³
Gás Natural	1,5 m ³
Óleo cru	0,72 L
Gasolina	0,98 L
Álcool	1,34 L
Eletricidade	2,21 Kwh

Quadro 03 – Equivalência energética de 1m³ de biogás

Fonte: LINDEMEYER, 2008

2.2.1. Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia consiste na decomposição de compostos orgânicos complexos em substâncias simples, tais como CH₄ e CO₂, em uma seqüência de degradações envolvendo diferentes tipos de bactérias na ausência de oxigênio. O processo de anaerobiose obedece às seguintes fases (CLASSEN et al. apud COSTA, 2006):

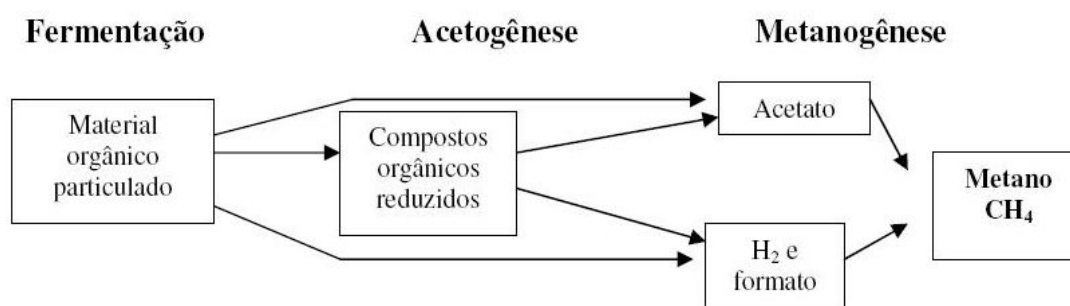


Figura 05 – Fases do Processo de Digestão Anaeróbia

Fonte: CLASSEN et al. (apud COSTA, 2006)

Os microrganismos responsáveis pela decomposição anaeróbia são compostos de três grupos de bactérias: fermentativas, acetogênicas e metanogênicas (POLPRASERT, 2007).

Na fermentação, os polímeros (estruturas complexas), tais como proteínas, gorduras, carboidratos e etc., são quebrados em monômeros (estruturas simples) por meio de reações de hidrólise na presença de enzimas extracelulares, constituindo-se em componentes simples e solúveis. Nas reações, as proteínas são convertidas em aminoácidos, os carboidratos em açúcares simples e as gorduras em ácidos graxos voláteis. Fatores como tipo de substrato, concentrações bacterianas, temperatura e pH afetam diretamente o ritmo das reações de hidrólise.

Na acetogênese, as bactérias produtoras de hidrogênio transformam os monômeros liberados (aminoácidos, açúcares, ácidos graxos voláteis e alcoóis) pela quebra hidrolítica na etapa anterior em acetato, H_2 e CO_2 , essenciais à metanogênese.

Na metanogênese é quando ocorre efetivamente a produção do metano, sendo, portanto, a principal etapa do processo de digestão anaeróbia. O acetato é o responsável por 70% da produção, considerado o precursor primário do produto final. O metano restante vem do H_2 e CO_2 . As bactérias metanogênicas, essencialmente anaeróbias, são divididas em função do substrato utilizado como:

- Acetoclásticas – utilizadoras de acetato
- Hidrogenotróficas – utilizadoras de hidrogênio

A eficiência do processo está condicionada às condições propícias ao desempenho das bactérias metanogênicas, caso contrário, haverá pouca produção de CH_4 e a estabilização do digestor não ocorrerá. Em condições ótimas, os metanogênicos regulam e neutralizam o pH da do digestor convertendo os ácidos graxos voláteis em CH_4 e outros gases.

Dessa forma, devem ser mantidas estáveis as condições ambientais de sobrevivência dos microrganismos anaeróbios, tais como (POLPRASERT, 2007):

- a) Temperatura – A temperatura é um fator essencial nas reações enzimáticas e produção do gás. O metano pode ser obtido em ambiente mesofílico (25 – 45°C) e termofílico (50 a 65°C), sendo que a produção aumenta proporcionalmente à temperatura até o limite de 45°C. A partir daí o meio torna-se impróprio tanto à bactéria mesofílica quanto à termofílica, e em 65°C cessa completamente. Não é recomendável operar abaixo de 10°C pela quantidade insuficiente de gás produzido, tampouco acima de 35°C pela necessidade de aporte energético

adicional ao digestor, o que poderá inviabilizar economicamente a operação. Logo, é a escala mesofílica que oferece o ambiente ótimo de produção, embora na termofílica seja mais eficaz a neutralização dos agentes patogênicos. Variações bruscas de temperatura também comprometem a sobrevivência dos microrganismos.

- b) pH e alcalinidade – O meio ótimo para produtividade das bactérias metanogênicas possui índice de acidez entre 7 e 7,2 e alcalinidade 2,5 a 5 mg/L. Ao atingir pH 5,5 há inibição da atividade bacteriana. A acidez excessiva do meio poderá ocorrer pela presença de grande quantidade de ácidos graxos ou materiais tóxicos no digestor, com o acúmulo de carga orgânica. Para equilibrar a atividade é recomendável interromper o carregamento orgânico até que as bactérias metanogênicas consumam as substâncias em excesso. Com a situação estabilizada, reinicia-se a alimentação do digestor. Além disso, podem ser utilizadas substâncias básicas para neutralizar o meio.
- c) Concentração de nutrientes – Neste caso é necessário que o substrato mantenha uma relação apropriada de C/N, haja vista que as bactérias utilizam o Carbono 25 a 30 vezes mais rápido do que utilizam o Nitrogênio. Em níveis mais altos, o Carbono reduz a atividade já que as bactérias não conseguem absorvê-lo por completo. Em níveis mais baixos o meio pode se tornar tóxico pela formação de Amônia, quando atinge altas concentrações. É igualmente essencial a presença de Fósforo, sem o qual a fermentação é nula.

A utilização de processos anaeróbios oferece algumas vantagens, tais como, a produção de metano e baixo custo de implantação, por necessitar de pouca área. Além disso, diferente da via aeróbia, não demandam energia elétrica e produzem 5 a 10 vezes menos lodo (AMBIENTE BRASIL, 2009).

A fermentação anaeróbia para tratamento de esgotos domésticos sempre foi utilizada pelo homem em sistemas de “fossas sépticas”, abrangendo pequenas comunidades. No final do século passado tais estruturas primárias foram substituídas pelos digestores ou reatores anaeróbios (COSTA, 2006, p. 38).

2.2.2. Reatores Anaeróbios

Os reatores anaeróbios podem ser divididos em dois importantes grupos: sistemas anaeróbios de baixa taxa ou convencionais e sistemas de alta taxa (CHERNICHARO, 2007).

Projetados para operar com baixa carga orgânica em pequenas instalações, os sistemas convencionais constituem-se em reservatório onde a digestão, o adensamento e a formação de sobrenadante ocorrem no mesmo estágio. Pela ausência de mecanismos de mistura e aquecimento, o processo demanda elevado tempo de retenção hidráulica (TRH), aproximadamente 30 a 60 dias, para a formação de microrganismos, o que implica em tanques de grande volume. Ocorre freqüentemente o surgimento de espuma. Neste sistema, o aproveitamento do digestor registra menos de 50% da capacidade prevista. Como exemplo de sistemas convencionais, tem-se (CHERNICHARO, 2007):

- Digestores de lodo – Aplicados ao tratamento efluentes domésticos e industriais com alta concentração de sólidos em suspensão.
- Tanques sépticos – Recomendados no tratamento de esgotos residenciais onde não há a prestação de serviço público ou o atendimento possui limitações de transporte ou capacidade de coleta. Em virtude do tamanho limitado, é necessária a remoção constante do lodo. A implementação está regulamentada pela NBR 7229/93 - ABNT.
- Lagoas anaeróbias – Também utilizadas no tratamento de efluentes domésticos e industriais, as lagoas anaeróbias possuem tamanho superior aos digestores de lodo e tanques sépticos, comportando grande volume de matéria orgânica. Neste caso, o tempo de remoção poderá obedecer a ciclos superiores a 10 anos. Devido a grande área ocupada expõe o ambiente à proliferação de insetos e maus odores, por isso, é imperativo o tratamento adequado.

Diferentemente dos sistemas convencionais, os sistemas de alta taxa possibilitam a retenção de grandes quantidades de biomassa com menor TRH. O crescimento da biomassa no interior do reator poderá ocorrer de forma aderida, quando é utilizado um filme biológico para fixação dos microrganismos, ou dispersa, onde as bactérias circulam livremente formando grânulos que posteriormente são sedimentados (CHERNICHARO, 2007).

Segundo o mesmo autor, como exemplo de reatores com biomassa aderida tem-se:

- Filtro anaeróbio – também conhecido como reator anaeróbio de leito fixo, funciona em fluxo ascendente ou descendente, permitindo que o substrato entre em contato com o biofilme promovendo as reações que culminarão na produção do gás. É comum o entupimento em fluxo descendente pelo acúmulo de sólidos no fundo do reator.
- Biodisco anaeróbio – também conhecido como reator anaeróbio de leito expandido, utiliza filmes em formato de discos com rotação constante por onde passa o esgoto e são fixadas as bactérias. Embora não ocorra entupimento, há dificuldade em distribuir uniformemente o afluente e controlar a biomassa aderida.
- Reator de leito expandido ou fluidificado – A recirculação ascendente do líquido em contatos com filmes menos espessos e grânulos menores permite a expansão do leito e uma maior aderência da biomassa em menor tempo de retenção hidráulica.

Dos reatores com biomassa dispersa conhecidos destaca-se o Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo – UASB.

O reator UASB surgiu na década de 70 a partir de pesquisas desenvolvidas pelo Dr. Gatzke Lettinga na Universidade de Agricultura de Wageningen, na Holanda (FIELD e SIERRA, 2002), com eficiência comprovada no tratamento de efluentes contendo altas concentrações de matéria orgânica e baixo teor de sólidos (POLPRASERT, 2007).

Em países tropicais há uma grande aderência na utilização desse sistema por dispensar aquecimento. É o mais utilizado no Brasil, acompanhando o avanço tecnológico no tratamento anaeróbio de efluentes (ROBRA et al., 2009).

Conforme representação esquemática da Figura 06, o reator UASB é dividido em 3 fases: leito de lodo na parte inferior, manta de lodo no centro, ambas responsáveis pela digestão, e separador trifásico no topo (POLPRASERT, 2007).

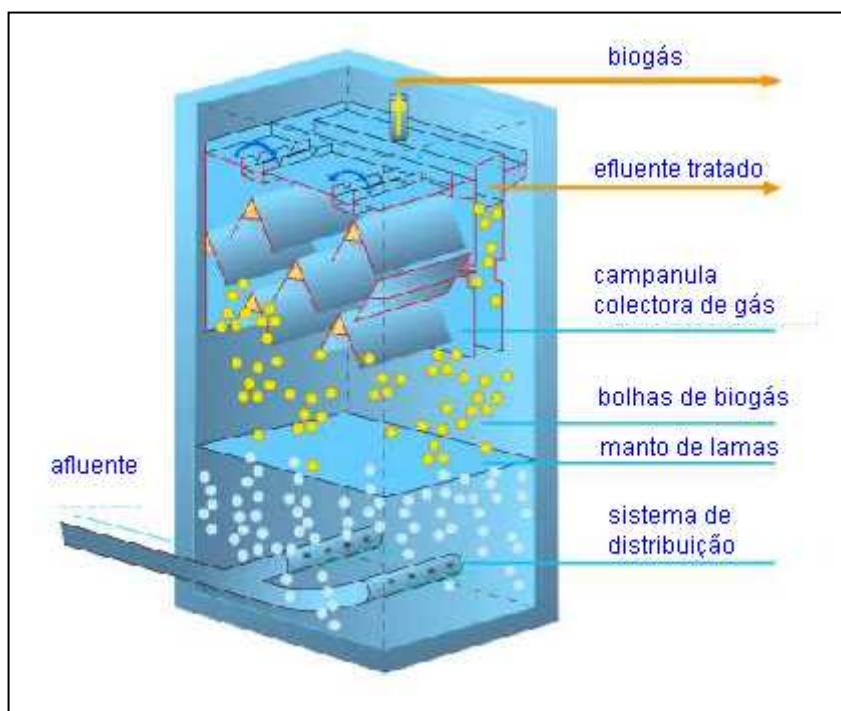


Figura 06 – Desenho esquemático de um reator UASB

Fonte: http://www.oh2.pt/Equip/Equip_Files/UASB.jpg

O processo é iniciado com o carregamento preliminar de lodo no fundo (leito). Em seguida, o afluente é distribuído pelo sistema a uma velocidade ascensional lenta de 0,5 a 1,5m/h, permitindo a formação de grânulos (BERNI; BAJAY, 2003). Após alguns meses, o lodo aumenta 4% a 10% formando uma camada densa e de rápida sedimentação (CHERNICHARO, 2007). O crescimento bacteriano ocorre na superfície do leito de lodo constituindo a manta de lodo, cuja sedimentação ocorre mais lentamente. Na passagem do substrato por estas duas fases a matéria orgânica é degradada, estabilizada e libera moléculas de gás por anaerobiose (BERNI; BAJAY, 2003), reproduzidas na Figura 06 pelas bolhas amarelas. Na fase 3, os defletores atuam como separadores dos estados sólido, líquido e gasoso, permitindo a retenção e retorno da biomassa dispersa e a saída do biogás e efluente tratado, separadamente. É comum a ocorrência de perdas no processo através do efluente, tanto do metano dissolvido (SOUZA et al., 2009), quanto da biomassa, arrastada em partículas menores. À época da partida ocorre a necessidade de recirculação do afluente e gás já que a velocidade inicial é insuficiente para a interação adequada entre o substrato e o lodo (CHERNICHARO, 2007).

São vantagens do reator UASB, além daquelas conferidas às condições anaeróbias, tais como baixa demanda por área, produção reduzida de lodo e baixo consumo energético (CHERNICHARO, 2007):

- Capacidade de elevada remoção orgânica, de 65% a 75%;
- Baixo tempo de retenção hidráulica;
- Baixo custo de implementação;
- Rápida partida, mesmo após longa paralisação;
- Lodo excedente com boa desidratabilidade e elevada concentração.

Embora eficiente e de grande aderência no tratamento de águas residuárias industriais e domésticas, este sistema também apresenta as seguintes desvantagens (POLPRASERT, 2007; CHERNICHARO, 2007):

- Dificuldade no controle do processo de granulação, a qual depende das propriedades do substrato;
- Propensão a maus odores;
- Intolerância a baixos níveis de toxicidade;
- Elevado intervalo de tempo para início do sistema;
- Pós-tratamento indispensável.

No Brasil, os biodigestores são utilizados principalmente para o saneamento rural, gerando biogás e biofertilizante (EMBRAPA, 2009).

2.2.3. Produção de Biogás a Partir de Esgotos Domésticos

Bassoi e Guazelli (2004) caracterizam os esgotos como efluentes líquidos domésticos constituídos basicamente de sólidos em suspensão, matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos. A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é utilizada para medir a carga orgânica existente no efluente, ou potencial poluidor, com base na concentração de oxigênio requerida para oxidação total da matéria orgânica (ROBRA et al., 2009). De acordo com o Centro Nacional de Referência em Biomassa (Cenbio), citado por Costa (2006), os elementos poluentes lançados nos corpos receptores sem o devido tratamento provocam conseqüências

calamitosas como a eutrofização – acúmulo de fósforo e nitrogênio no ambiente –. Outro malefício dos esgotos diz respeito à proliferação de doenças (WHO, 2009).

O Cenbio (2009) defende que o uso do biogás promove a descentralização da geração já que todo o adensamento populacional poderá funcionar como produtor de energia. Tanto nas residências e indústrias quanto nas propriedades rurais existe a produção de resíduos que se tratados pela via anaeróbia podem ser convertidos em biogás. Países da União Européia, conscientes acerca dos danos causados pelas emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis, estão investindo em projetos de uso do biogás para a geração de energia elétrica.

O atraso do Brasil em relação a outros países no que tange à recuperação do biogás decorre, principalmente, da falta de incentivo governamental e das diferenças culturais em relação às outras nações (ROBRA et al., 2009), entretanto, é crescente o aproveitamento do biogás produzido a partir de dejetos de animais da suinocultura e avinocultura, da decomposição do vinhoto oriundo das destilarias e da matéria orgânica disposta em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto (EMBRAPA, 2006).

O Cenbio (2001) contempla ainda que os resíduos gerados no meio rural utilizados indiretamente para adubação, além do potencial aproveitamento como biogás, economizariam a energia requerida na fabricação do adubo. Merecem destaque na produção de dejetos as criações de bovinos, suínos e aves. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2004), o rebanho de bovinos no ano atingiu 204,5 milhões, enquanto que na suinocultura e avinocultura foram registrados 33 milhões de suínos e 950,5 milhões de aves, demonstrando o potencial do país no segmento.

Segundo a *Internationale Weiterbildung und Entwicklung gGmbH – INWENT*⁴, a China possui lei de fomento às energias renováveis e incluiu nos projetos de governo a instalação de biodigestores rurais nas propriedades, atualmente com 5 milhões de equipamentos atendendo a 50 milhões de famílias, posicionando o país como líder mundial, seguido pela Índia, Egito e Peru. O biogás produzido é destinado principalmente ao aquecimento, cocção, secagem de produtos agrícolas e geração de energia elétrica em pequena escala (ROBRA et al., 2009).

⁴ Organização da República Federal da Alemanha dedicada à capacitação internacional de recursos humanos e à cooperação para o desenvolvimento.

De acordo com a Associação Alemã de Biogás, as políticas de fomento do governo estimularam o surgimento de usinas produtoras de biogás somando, aproximadamente, 4.000 no final de 2008. O biogás tanto é destinado à rede nacional de energia elétrica quanto para utilização como gás natural, após processo de purificação (ROBRA et al., 2009).

A grande quantidade de resíduo orgânico produzida nas atividades agrícolas, pecuárias e industriais, além do lixo urbano, representa um potencial energético significativo como matéria-prima para a produção de biogás, pelo processo de digestão anaeróbia. Do ponto de vista econômico, a utilização do biogás na geração de energia alternativa aumenta a eficiência energética do país, transformando um subproduto do processo em insumo para a produção de energia. Já no aspecto ambiental contribui com a redução de gases efeito estufa (COSTA, 2006).

2.3. APLICAÇÃO DO BIOGÁS NA OBTENÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Costa (2006) infere que o uso da energia de biogás apresenta-se como a melhor opção no tocante à gestão de resíduos no país, embora não solucione todos os problemas existentes.

Em se tratando do setor de saneamento, Salomon e Lora (2005) citam alguns benefícios relacionados à produção de energia elétrica a partir de biogás, tais como:

- Descentralização de geração de energia;
- Proximidade com o mercado consumidor;
- Destinação nobre à biomassa potencialmente energética tratada como resíduo;
- Redução do custo com energia elétrica;
- Redução das emissões de metano à atmosfera mitigando o efeito estufa;
- Possibilidade de obtenção de créditos de carbono.

No caso do esgotamento sanitário, Costa (2006) relata o projeto desenvolvido na ETE de Barueri, concebido para gerar 2 a 2,8MW, como exemplo do potencial dos esgotos na geração de energia elétrica. Com investimentos da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) em parceria com outros órgãos de fomento foi possível demonstrar a viabilidade econômica e os ganhos ambientais do projeto.

Outros exemplos citados pelo autor são os aterros Bandeirantes, em São Paulo, destacando-se mundialmente pela capacidade de gerar energia elétrica durante 10 anos para

abastecer uma população de 400 mil habitantes; Nova Iguaçu, no Rio de Janeiro, pioneiro em vendas de créditos de carbono à Holanda, correspondendo a 5 milhões de euros; São João, em São Paulo; e Metropolitan Centro, na Bahia.

Segundo o Cenbio (2001), países como a Alemanha, Itália, Inglaterra e Espanha incentivam a geração de energia elétrica a partir do biogás por meio de políticas favoráveis ao desenvolvimento sustentável.

2.3.1. Tecnologias de Conversão

Das tecnologias disponíveis para geração de energia elétrica utilizando o biogás destacam-se as turbinas a gás e os grupos de geradores de combustão interna. Ambas têm o papel de transformar a energia química do gás em energia mecânica que impulsionará um alternador para conversão em energia elétrica (COSTA, 2001).

As turbinas a gás (Ciclo *Brayton*) funcionam sob alta pressão injetando ar comprimido em uma câmara de combustão provendo o sistema do oxigênio necessário para a queima. O gás resultante pressiona um compressor e um gerador. O processo será tão mais eficiente quanto maior for a temperatura e pressão de entrada e menor for a temperatura de exaustão. As turbinas a gás são classificadas em relação à potência em:

- a) Microturbinas – até 100kW;
- b) Turbinas de médio e grande porte – maior que 100kW até 300 MW;
- c) Turbinas a vapor – utilizam um sistema de co-geração para conversão de energia térmica em energia mecânica.

Já os grupos de geradores de combustão interna (Ciclos *Diesel* e *Otto*) geram a energia elétrica pela conexão de um gerador ao motor.

Os equipamentos disponíveis no mercado para geração de energia elétrica utilizando biogás foram fabricados visando o aproveitamento dos dejetos de animais. Para aplicação em esgotos será necessário verificar o teor de metano da matéria orgânica e, a partir de então, selecionar a potência adequada, a fim de obter a melhor eficiência do gerador (FOCKINK, 2009).

2.4. SANEAMENTO, SUSTENTABILIDADE E ENERGIA

Para a Organização Mundial de Saúde (OMS) o saneamento consiste no “controle dos fatores do meio físico do homem que podem exercer efeito deletério sobre o seu bem estar físico, mental e social”. Perpassa pela disposição final adequada dos resíduos produzidos pelo homem, através dos serviços de coleta de lixo e esgotamento sanitário, e manutenção das condições de higiene. A OMS aponta o saneamento inadequado como o principal responsável pela proliferação de doenças no mundo (WHO, 2009).

O saneamento, desde a pré-história, é essencial à saúde e qualidade de vida da população, provendo água potável e serviços de esgotamento sanitário compreendido pela coleta e tratamento de águas residuárias (REICH et al., 2008). Com o crescimento dos grandes centros urbanos os recursos naturais, sobretudo a água, passaram a ser consumidos de forma insustentável. Outro agravante diz respeito à poluição hídrica e do solo que, combinada aos atuais padrões de consumo intensifica os problemas relativos à saúde pública (COHIM et al., 2009).

Os autores entendem que a sustentabilidade das cidades é o primeiro passo para a construção da sustentabilidade global, equilibrando as questões ambientais urbanas.

O conceito de desenvolvimento sustentável, consolidado pela Comissão de *Brundtland* na publicação do informe intitulado “O Nosso Futuro Comum”, em 1987, coloca a política ambiental como essencial no processo de desenvolvimento, fundamentalmente pelo fato de que as necessidades e expectativas humanas presentes e futuras tornaram-se o foco principal. Defende que a transição do modelo de desenvolvimento pelo lucro para outro que busque o bem-estar do indivíduo e o equilíbrio com a natureza pressupõe uma mudança de postura em relação ao meio ambiente, substituindo o modo de produção que acentua as desigualdades sociais e extingue os recursos naturais pela sustentabilidade, cuja base está alicerçada em 3 pilares: desenvolvimento econômico, equidade social e preservação do meio ambiente (DIAS, 2007).

O uso sustentável da água enquanto recurso primordial do saneamento é o cerne da questão em torno do consumo no setor. A relação tradicional de oferta e demanda dos recursos hídricos parte do pressuposto da inesgotabilidade. Esforços são empreendidos para o atendimento à uma demanda sempre crescente, exigindo cada vez mais investimento e energia, provocando o agravamento da poluição. Apenas em momentos de crise iminente

caracterizada pela impossibilidade de atendimento à demanda há uma alternância na gestão do recurso convertendo o foco para a racionalização (COHIM et al., 2009).

Os autores presumem como igualmente importantes ao aumento da oferta a redução do consumo e o controle dos desperdícios. A segregação de corrente surge como uso alternativo da água de forma sustentável, buscando otimizar o uso da água utilizando-a “com a qualidade compatível com o fim a que se destina”, ou seja, reservando a água potável apenas para ingestão relegando às atividades de lavagem e descarga águas pluviais ou de reuso. A configuração atual das residências e condomínios possui um único sistema de captação e afastamento utilizando água potável para qualquer finalidade, entretanto, a segregação traz benefícios não só do ponto de vista da redução como também energético, já que o esgoto menos diluído favorece no tratamento e decomposição da matéria orgânica para produção de biogás, melhorando o potencial para produção de energia elétrica.

A energia elétrica é insumo precípua às atividades do setor de saneamento, permitindo a captação da água na fonte e transporte às estações de tratamento, distribuição aos pontos de consumo, coleta do esgoto, tratamento e disposição final em corpos receptores (COHIM et al., 2009). Segundo Gomes, 2005, os equipamentos motor-bomba absorvem cerca de 90% da energia elétrica utilizada nos sistemas de saneamento.

Gomes (2005) complementa que ainda existem as perdas físicas – evasão de água no sistema – e as perdas por consumo não contabilizado, ocasionado pelos seguintes fatores:

- Formas contratuais indevidas;
- Procedimentos operacionais inadequados;
- Desperdícios de água;
- Mau dimensionamento dos sistemas;
- Idade avançada dos equipamentos;
- Tecnologias mal utilizadas;
- Erros de concepção dos projetos;
- Manutenções precárias.

2.4.1. Situação Atual do Saneamento no Brasil

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, publicada pelo IBGE, em 2000, revela a precariedade na prestação de serviços de saneamento no país. O serviço de esgotamento

sanitário é o menos representativo entre os municípios brasileiros. Dos 5.564 municípios (IBGE, 2007) apenas 52% estavam cobertos pelo serviço (IBGE, 2000).

O IBGE (2000) aponta que apenas 1/3 dos distritos tratam o esgoto. Os demais, 66,2%, lançam *in natura* no solo e mananciais hídricos, sendo os rios o destino de 84,6% do esgoto não tratado. As Regiões Norte e Sudeste predominam com 93,8% e 92,3%, respectivamente, enquanto que o Nordeste com 65,8% é a região que menos pratica despejos em rios, mantendo baixos também os índices nos demais corpos d'água.

Salomon e Lora (2005) citam que a deficiência no tratamento dos esgotos no Brasil é responsável pela proliferação de doenças, atingindo, principalmente a população de baixa renda. Até nos grandes centros urbanos o esgoto é lançado em corpos receptores sem tratamento para redução da carga tóxica. Para os autores, o esgoto enquanto fonte geradora de biogás constitui-se em alternativa de melhoria à questão do saneamento no país por contribuir com o aumento da geração de energia e redução dos impactos ambientais.

Jr. e Aguiar (2005) complementam que o tratamento e reaproveitamento adequado do esgoto, por exemplo, utilizando-o para produção de energia, poderá reduzir a demanda energética melhorando o desempenho econômico e ambiental do setor favorecendo a intensificação de seu objetivo de promover a saúde e qualidade de vida da população.

2.5. ASPECTO AMBIENTAL

A partir da análise de Costa (2006), entende-se que não há restrições ambientais quanto à conversão do biogás em energia elétrica, apenas benefícios na utilização de uma fonte limpa e renovável, com a mitigação da emissão de gases efeito estufa responsáveis pelo aquecimento global. A simples queima do biogás converte o CH₄ em CO₂ e minimiza o impacto, entretanto, é um desperdício de potencial energético.

Alves (2000, p.15) conceitua o efeito estufa como “a capacidade que tem a atmosfera terrestre de absorver radiação infravermelha”. Ao atingir a terra, a maior parte da energia solar é absorvida e aquece o planeta, o restante é refletido pela superfície e pela atmosfera. Alguns gases presentes na atmosfera têm a capacidade de conservar a radiação solar criando um envoltório ao redor da terra. São os chamados gases de efeito estufa (GEE), destacando-se o vapor d'água e outros gases de ação antrópica, tais como, CH₄, resultado da queima de combustíveis fósseis, N₂O, resultado de atividades bacterianas no solo, e CFC, empregados em aerossóis, refrigeradores e embalagens plásticas.

Para Costa (2006), os GEE são essenciais à vida na terra por manter o planeta em temperatura habitável. O CO₂ é reconhecido como o principal gás de efeito estufa, por isso, a emissão excessiva de poluentes, sobretudo pela queima de combustíveis fósseis, agrava o efeito estufa e, conseqüentemente, as mudanças climáticas.

Segundo Alves (2000), é mais caro o custo de recuperação do CO₂ em relação aos demais gases, portanto, recomenda o aproveitamento do metano liberado na digestão da matéria orgânica como forma de reduzir a emissão dos GEE. Para o setor de saneamento, por exemplo, representa recurso energético e redução de custos.

2.5.1. Protocolo de Quioto

Conforme elucidada Simão (2006), o Protocolo de Quioto, criado em 1997 e instituído em 2005, comprometeu os países industrializados a reduzirem as emissões de GEE por meio de metas que determinaram a redução de 5,2% das emissões no período de 2008 a 2012, cujo marco referencial foi fixado no índice global de 1990. Os países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, pela industrialização tardia, ficaram isentos do compromisso. Para estes, recomendou-se a implantação de projetos voltados ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Os mecanismos para auxiliar o cumprimento das metas de emissão são:

- Implementação conjunta (*Joint Implementation*) - permite aos países incluídos no Anexo I⁵ de fomentarem projetos de redução em nações que necessitem menos financiamento;
- Comércio de emissões (*Emission Trading*) – permite aos países que reduziram abaixo da meta comercializarem o excedente. É válido apenas entre os países do Anexo I;
- Bolhas (*bubbles concept*) – permite que os países do Anexo I cumpram as metas em conjunto.
- Mecanismo de desenvolvimento limpo (*clean development mechanism*) – permite que os países desenvolvidos ou em desenvolvimento comercializem os créditos de carbono obtidos com os projetos sustentáveis.

⁵ Países listados no Anexo I da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQNUMC)

2.5.2. Método IPCC para Estimativas de Emissões dos Esgotos

A quantidade de CH₄ lançado na atmosfera proveniente da degradação anaeróbia da matéria orgânica presente em efluentes domésticos e comerciais poderá ser estimada aplicando-se a metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC⁶), através da equação 2.1 a seguir (ALVES, 2000, p. 47):

$$E = \text{Popurb} \times \text{taxaDBO}_5 \times \text{FET} \times \text{FCM} \times \text{MFER} - R \quad (3.1)$$

Sendo:

E = Emissão de metano (GgCH₄/ano)

Popurb = População urbana do país (habitantes)

taxaDBO₅ = Taxa unitária de geração de Demanda Bioquímica de Oxigênio (no Brasil é de 18.250DBO₅/habitante.ano)

FET = Fração de esgotos tratada (entre 10% e 20%)

FCM = Fator de correção de metano (entre 80% e 90%)

MFER = Máximo fator de emissão de metano (25%)

R = Quantidade de metano recuperado (0GgCH₄/ano)

A emissão de metano no Brasil, conforme método IPCC, é estimada em:

$$E_{\text{Brasil}} = 107\,800\,000 \times 18\,250 \times 0,1 \times 0,8 \times 0,25$$

$$E_{\text{Brasil}} = 43 \text{ GgCH}_4/\text{ano}$$

Os países em desenvolvimento, embora concentrem 80% da população mundial, participam com 18% da emissão global de CO₂, enquanto que os países desenvolvidos, maiores causadores do efeito estufa, contribuem com 72% (SIMÃO, 2006).

⁶ *International Panel on Climate Change*

Os resíduos sólidos são responsáveis por 84% das emissões provocadas por resíduos, seguidos dos efluentes industriais com 11%, e a participação menos representativa dos efluentes domésticos com 5% (ALVES, 2000).

2.6. ASPECTO ECONÔMICO

A produção de energia a partir da utilização de um subproduto do processo é o fator econômico mais relevante por agregar valor ao que se consideraria resíduo, cuja destinação final seria o descarte no ambiente. Sendo assim, o reaproveitamento do esgoto doméstico pelo processo de digestão anaeróbia para produção de biogás poderá colaborar com a eficiência energética do país reduzindo a demanda pelos combustíveis fósseis (CENBIO, 2008).

A busca por incentivos ao uso de fontes alternativas de energia poderão equilibrar e até compensar os custos envolvidos com a implementação de projetos que visem a eficiência energética (COSTA, 2006).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar a viabilidade econômica de aproveitamento do potencial energético do biogás na geração de energia elétrica realizou-se um estudo de caso na ETE de Madre de Deus, seleção da tecnologia de conversão e variáveis consideradas para a demonstração de viabilidade econômica.

3.1. ESTUDO DE CASO NA ETE DE MADRE DE DEUS

De acordo com o Relatório Anual da Administração e Demonstrações Financeiras – 2008, a Embasa atende a 355 municípios baianos com abastecimento de água e 56 com esgotamento sanitário, abrangendo 85% e 13% das sedes municipais do Estado, respectivamente (EMBASA, 2008).

O Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto referente ao ano de 2007 aponta que o consumo de energia elétrica com água pela empresa no ano foi de 563.937MWh, enquanto que o consumo de energia elétrica com esgoto correspondeu a 62.109MWh (SNIS, 2009). O preço final da tarifa de energia elétrica fixado pela concessionária em Out./09 para o serviço público de água e esgoto correspondeu a R\$ 0,36641 por KWh (COELBA, 2009).

Outros dados operacionais da Embasa publicados pelo Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS, 2009) são mostrados no Quadro 04 a seguir.

Abastecimento de Água	
População total atendida	8,8 milhões
Quantidade de ligações	2,4 milhões
Extensão da rede de água (Km)	27 milhões
Esgotamento Sanitário	
População total atendida	2,96 milhões
Quantidade de ligações	538 mil
Extensão da rede (Km)	5,7 mil

Quadro 04 – Dados operacionais da Embasa em 2007

Fonte: SNIS, 2009

De acordo com dados do Projeto de Ampliação (2009), a ETE de Madre de Deus atua na coleta e tratamento de esgotos atendendo a uma população de 28.932 habitantes, com vazão de 3.954 m³/dia (EMBASA, 2009).

Ainda segundo o Projeto de Ampliação (2009), o processo de tratamento de esgoto ocorre a partir da remoção de matéria orgânica biodegradável (DBO), sólidos em suspensão e coliformes fecais e ocorre em unidades distintas nas fases:

a) Líquida:

- Digestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (UASB) - diminuição da carga orgânica pela decomposição anaeróbia liberando o biogás;
- Lodos ativados – redução adicional da matéria orgânica através de microrganismos aeróbios cujo fornecimento de oxigênio se dá por meio de aeradores mecânicos que cumprem também a função de manter a biomassa suspensa na coluna líquida;
- Sistemas de desinfecção - redução dos microrganismos patogênicos pela ação de raios ultravioleta.

b) Sólida:

- Leitões de secagem - desidratação e redução volumétrica do lodo.

Ao final do tratamento, o efluente é lançado no mar enquanto que o lodo desidratado é disposto em Aterro Sanitário.

3.2. PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Uma das formas de se determinar o potencial de produção do biogás é estimando a quantidade de DQO removida pelo reator convertida em CH₄ (DQO_{CH₄}). O modelo adotado por Chernicharo (2007) para calcular a produção de biogás inicia com a conversão da DQO em CH₄ aplicando a equação a seguir.

$$DQO_{CH_4} = Q \times (S_0 - S) - Y_{obs} \times Q \times S_0 \quad (3.1)$$

Sendo:

Q = vazão de esgoto afluyente (m³)

S_0 = DQO afluyente (kgDQO/m³)

S = DQO efluente (kgDQO/m³)

Y_{obs} = coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (0,11 a 0,23 kgDQO_{lodo}/kgDQO_{apl})

O valor de S , ou DQO efluente, é obtido em função da eficiência de remoção do reator (E) pela equação:

$$S = (1 - E) \times S_0 \quad (3.2)$$

Durante o processo, parte da DQO é absorvida na sintetização celular promovendo o aumento da biomassa (lodo), cujo valor é representado por $Y_{obs} \times Q \times S_0$. A partir do resultado obtido é possível calcular o volume de metano produzido aplicando a equação:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (3.3)$$

Sendo:

Q_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m³/dia)

$K(t)$ = fator de correção para a temperatura operacional do reator (kgDQO/m³), onde:

$$K_t = \frac{P \times K}{R \times (273 + t)} \quad (3.4)$$

Sendo:

P = pressão atmosférica (1 atm)

K = COD correspondente a 1 mol de CH_4 (64 gDQO/mol)

R = Constante dos gases (0,08206 atm.L/mol. °K)

t = temperatura operacional do reator (°C)

Parte significativa do metano produzido no reator poderá ser perdida solubilizada no efluente, reduzindo o potencial energético do biogás. Segundo Van Haandel e Lettinga, “o biogás é produzido em um digestor anaeróbio quando as concentrações dos constituintes na fase líquida excedem as concentrações de saturação”. Através de Lei de Henry, conhecendo a pressão parcial do gás sobre a superfície líquida é possível obter a quantidade do gás dissolvido (SOUZA et al., 2009, p. 1).

Experimentos realizados em reatores UASB em escalas de demonstração e piloto possibilitaram identificar o percentual de perda do CH_4 . Os resultados demonstraram perda significativa de metano dissolvido, de 36,9% no reator de demonstração e 44,8% no reator piloto, relativamente a todo o metano gerado (SOUZA et al., 2009).

Sendo assim, o cálculo do potencial de produção do biogás ($Q_{\text{biogás}}$) deverá levar em consideração a perda de metano dissolvido no efluente, por meio da equação:

$$Q_{CH_4\text{líquido}} = (1 - \% CH_4\text{dissolvido}) \times Q_{CH_4} \quad (3.5)$$

$$Q_{\text{biogás}} = Q_{CH_4\text{líquido}} \times \% CH_4\text{biogás} \quad (3.6)$$

Os valores de entrada para cálculo da produção de biogás variam em razão de uma série de fatores, por conseguinte, são usualmente expressos em parâmetros máximos e mínimos, conforme Tabela 06.

Tabela 06 – Valores de entrada para cálculo da produção de biogás

Variáveis	Q	S ₀	E	Y _{obs}	t	% CH ₄ _{dissolvido}	% CH ₄ _{biogás}	PCI biogás
	m ³ /d	g/m ³	%	mg/L	°C	%	%	kcal/kg
Mínimo	3.560	376	40%	0,11	20	36,9%	65%	4.831,14
Máximo	5.140	1.300	75%	0,23	27	44,8%	75%	6.253,01

Fontes: CHERNICHARO, 2007; COSTA, 2006; EMBASA, 2009; GRUPO FOCKINK, 2009; SOUZA, et al., 2009

A vazão do esgoto afluente (Q) considerou dados do Projeto de Ampliação da ETE de Madre de Deus (2009), de acordo com resultados diários no período de tempo em estudo.

A DQO afluente (S₀) considerou os valores registrados no Relatório de Medição Diária da ETE de Madre de Deus (2009), no período de 02 de janeiro de 2008 a 20 de agosto de 2009.

A eficiência de remoção do reator (E) baseou-se em experimentos relatados por Chernicharo (2007) realizados em cinco tipos de reatores UASB a temperaturas de 20°C a 27°C, onde se alcançou uma eficiência de 40% a 75% de DQO afluente (S₀) removido.

O coeficiente de produção de sólidos no sistema (Y_{obs}) para Chernicharo (2007, p.239) “incorpora tanto a acumulação de sólidos não biodegradáveis no lodo, quanto o crescimento e decaimento de microrganismos”. É expresso em valores de 0,11 a 0,23kgDQO_{lodo}/kgDQO_{apl}.

A temperatura operacional do reator (t) considerou a variação em °C aplicada ao experimento para obtenção do percentual de DQO afluente (S₀) removido em reatores UASB.

O percentual de metano dissolvido no efluente (% CH₄_{dissolvido}) considerou experimentos realizados em reatores UASB cuja perda atingiu valores de 36,9% e 44,8% (SOUZA et al. 2009).

A variação percentual de CH₄ no biogás (% CH₄_{biogás}) considerou fatores como a quantidade mínima de metano necessária ao funcionamento do gerador, prevista na Proposta Técnica/Comercial do Grupo Fockink (2009) em 65%, e a proporção máxima de 75% na constituição do biogás, de acordo com Sasse (1998) no item 2.2.

O PCI, utilizado para cálculo do potencial elétrico, considerou a variação do poder calorífico do biogás em relação às proporções de CH₄ e CO₂, segundo Costa (2006) no item 2.2, adotando as faixas de variação percentual de CH₄ de 65% a 75%.

3.3. POTENCIAL ELÉTRICO DO BIOGÁS

De acordo com estudos realizados na Sabesp, é possível calcular o potencial elétrico do biogás a partir da quantidade de esgoto tratado por dia aplicando a equação a seguir (COSTA, 2001).

$$PE = \frac{Q_{\text{biogás}} \times PCI_{\text{biogás}} \times \eta_{\text{gerador}} \times 4,1868}{86.400} \quad (3.7)$$

Sendo:

PE = potência elétrica (KW)

$Q_{\text{biogás}}$ = vazão (produção média) do biogás (m³/dia)

$PCI_{\text{biogás}}$ = poder calorífico do biogás (kcal/m³)

η_{gerador} = 30%, baseado no valor médio das tecnologias de conversão

4,1868 = fator de conversão de “kcal” (quilo caloria) para “kJ” (quilo joule), onde 1 KJ/s corresponde a 1 MW.

3.4. MÉTODO DE MONTE CARLO PARA CÁLCULO DO POTENCIAL ELÉTRICO

Segundo Pengelly (2002), o Método de Monte Carlo é um modelo estocástico baseado em simulações para obtenção de resultados probabilísticos. O termo “Monte Carlo” faz alusão aos cassinos da capital de Mônaco cujas roletas geram resultados aleatórios. É comumente aplicado à investigação de problemas que envolvam variáveis aleatórias, sobretudo em circunstâncias complexas.

A aplicação do método na identificação do potencial elétrico justifica-se pela variação dos dados de entrada aqui representados em parâmetros máximos e mínimos.

O cálculo resulta na geração de N cenários para os valores de entrada, de forma aleatória, permitindo a obtenção de um intervalo de resultados cuja confiabilidade está em proporção direta à quantidade de cenários analisados (FERNANDES, 2005). O método é utilizado de forma sistemática em diversas áreas do conhecimento, tais como química,

engenharia e informática desde a Segunda Guerra Mundial, quando empregado no desenvolvimento da bomba atômica (PENGELLY, 2002).

Será considerada a potência de geração mediana à probabilidade de 50%.

3.5. EQUIPAMENTO DE CONVERSÃO

A conversão do biogás em energia elétrica será feita utilizando um grupo gerador Fockink a biogás, modelo SG-75B, com potência contínua de 62KW. A seleção do gerador levou em consideração a produção do biogás buscando o atendimento de 80% da potência prevista.



Figura 07 – Modelo de gerador a biogás
Fonte: Grupo Fockink, 2009

3.5.1. Especificações Técnicas

O Quadro 05 mostra as especificações técnicas do equipamento, de acordo com o fabricante.

Módulo Gerador	
Motor a biogás:	<ul style="list-style-type: none"> – Marca: Mercedes-Benz; – Modelo: OM366G; – Tipo: Aspirado, 04 (quatro) tempos, 06 (seis) cilindros em linha; – Sistema de arrefecimento: à água através de radiador com ventilador soprante; – Filtros: ar a seco e óleo lubrificante.
Gerador:	<ul style="list-style-type: none"> – Tipo: alternador síncrono, trifásico, <i>brushless</i>; – Excitação: excitatriz rotativa sem escovas com regulador automático de tensão; – Potência: <ul style="list-style-type: none"> a) Contínua: 78kVA/62kW; b) <i>Prime-power</i>: 70kVA/56kW. (aprox. 1h de trabalho) – Tensão: 380/220Vca; – Frequência: 60Hz; – Ligação: estrela com neutro acessível; – Número de pólos/rpm: 4 pólos/ 1800 rpm; – Regulação: regulador de tensão eletrônico, que assegura máxima precisão e velocidade de correção das variações de carga.
Painel Elétrico	
Quadro de Comando Manual – partida direta:	<ul style="list-style-type: none"> – Sistema de Medição: <ul style="list-style-type: none"> a) Voltímetro F-F (leitura de tensão de rede e grupo); b) Amperímetro (leitura da corrente de carga); c) Horímetro (leitura de horas de funcionamento); d) Freqüencímetro (leitura de frequência elétrica do sistema). – Sistema de Proteção: <ul style="list-style-type: none"> a) Alta temperatura d' água; b) Baixa pressão do óleo; c) Curto circuito/sobrecarga (disjuntor).

Quadro 05 – Especificações Técnicas do Grupo Gerador Fockink SG-75B

Fonte: Grupo Fockink, 2009

Para o funcionamento adequado do motor é indispensável o que o biogás contenha pelo menos 65% de metano na sua composição.

O efeito corrosivo do H₂S será reduzido por meio de filtro fornecido pelo fabricante o qual, além de diminuir a concentração do gás sulfídrico, propiciará a retenção de eventuais partículas presentes no biogás, preservando o funcionamento do gerador.

O transporte do biogás produzido no digestor até o gerador é feito por compressor radial de 1CV, fornecido pelo fabricante.

3.5.2. Custos de Investimento, Manutenção e Operação

Os custos com equipamentos, materiais e obras necessários à implantação do gerador são descritos no Quadro 06.

Equipamentos e outros	Custo (R\$)
Investimento total	94 250,00
Grupo Gerador Fockink a Biogás - Modelo SG-75B	78.250,00
Isolamento térmico do escapamento	3.000,00
Tubulação para biogás desde o biodigestor até o grupo gerador	3.000,00
Obras Civas e Construções (12m ²)	5.000,00
Instalação elétrica da rede da concessionária até o painel	1.500,00
Frete	1.500,00
Margem de incerteza (30% do investimento total)	28.275,00
BDI – Benefícios e Despesas Indiretas (30% do total geral)	36.757,50
Total capital investido	159.282,50

Quadro 06 – Custo de implantação do grupo gerador Fockink - 62KW

Fonte: Adaptado de Grupo Fockink, 2009

O total de capital investido considerou um acréscimo de 30% como margem de incerteza no custo do investimento total, a fim de corrigir eventuais distorções nos valores orçados. Ao resultado foram acrescidos 30% a título de benefícios e despesas indiretas – BDI para provisão de outros custos indiretos não relacionados na planilha orçamentária.

Além destes, são previstos custos com manutenção e troca de componentes de acordo com informações fornecidas pelo fabricante mostradas no Quadro 07.

Componentes	Intervalo	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total	Custo Anual
	h	unid.	R\$	R\$	R\$
Custo com manutenção periódica					8.124,90
Troca de velas	300	6	13,00	78,00	2.277,60
Troca de cabos de velas	1.000	6	20,00	120,00	1.051,20
Troca de óleo	400	18	9,50	171,00	3.744,90
Troca do filtro de óleo	400	1	48,00	48,00	1.051,20
Custo com manutenção de longo prazo					7.117,50
Reforma do motor	8.000	1	6.500,00	6.500,00	7.117,50
Troca do gerador	32.000	1			19.562,50
Margem de incerteza (20% do total com O&M)					6.960,98
Custo total com manutenção					41.765,88

Quadro 07 – Custos de Operação e Manutenção - O&M

Fonte: Adaptado de Grupo Fockink, 2009

Houve acréscimo de 20% no custo final com manutenção como margem de incerteza, para correção de eventuais distorções nos valores orçados.

3.6. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

As variáveis consideradas para a demonstração de viabilidade econômica são o Tempo de Retorno do Capital (TRC) descontado, a Relação Benefício/Custo (B/C) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Pela metodologia de engenharia econômica aplicada por Gomes (2005) foram calculados os indicadores que subsidiarão a análise.

O TRC ou *payback* descontado determina o tempo de recuperação do investimento, o que ocorre quando o montante investido torna-se igual ao Valor Presente Líquido (VPL). Em um investimento atrativo o tempo de vida útil do projeto deverá ser maior do que o tempo de retorno do capital.

O VPL corresponde ao valor dos fluxos de caixa trazidos para a data atual, gerado pelas receitas (benefícios) e despesas (custos) ao longo de sua vida útil. É definido pela equação:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{B'_j}{(1+i)^t} \quad (3.8)$$

Onde B corresponde à diferença entre os benefícios e os custos para n períodos de tempo e i é a taxa de juros corrente ao período n .

O negócio é economicamente viável para valores de VPL positivo e inviável se o VPL for negativo. Quando o VPL iguala-se a zero o investimento é considerado indiferente.

A análise B/C representa a razão entre o valor atual dos benefícios e o valor atual dos custos, incluindo o investimento inicial. Utiliza-se o Fator de Valor Presente (FVP) para atualização monetária dos benefícios e dos custos considerando a taxa de juros anual dentro do período definido no fluxo de caixa. A relação B/C é calculada pela equação:

$$BC = \frac{(\text{soma dos benefícios}) \times \text{FVP crescente}}{(\text{soma dos custos}) \times \text{FVP uniforme}} \quad (3.9)$$

Em que o FVP crescente é calculado em função da taxa de crescimento de determinado insumo e o FVP uniforme considera apenas a taxa de juros anual para o período em questão.

A TIR corresponde à taxa de juros que anula o VPL, igualando o valor presente dos benefícios e dos custos. É adequado à análise de projeto cuja viabilidade independa do resultado de outros.

O negócio é viável para valores de TIR maiores que a taxa de juros de referência. Nos casos em que a taxa de juros apresente-se igual ou maior que a TIR, o investimento é considerado indiferente ou inviável, respectivamente.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo será demonstrado o potencial elétrico da ETE estudada através da produção do biogás, assim como, os estudos que permitiram comprovar a viabilidade econômica do investimento.

4.1. POTENCIAL ELÉTRICO DO BIOGÁS GERADO NA ETE DE MADRE DE DEUS

A partir dos parâmetros máximos e mínimos definidos para cada variável de entrada foram gerados 1.000 cenários aleatórios entre os intervalos, utilizando o *software* Microsoft Excel.

Os resultados estão apresentados na Tabela 07 por distribuição de frequência acumulada, o que permite identificar valores medianos para as probabilidades, onde $1/2$ da distribuição encontra-se acima e $1/2$ encontra-se abaixo da faixa de 50%.

Tabela 07 – Variáveis de entrada para o Método de Monte Carlo

Variáveis	Q	S ₀	E	Y _{obs}	t	Q _{CH₄líquido}	% CH ₄ biogás	PCI biogás
	m ³ /d	g/m ³	%	mg/L	°C	%	%	kcal/kg
Mínimo	3.560	376	40%	0,11	20	35%	65%	4.831,14
Máximo	5.140	1.300	75%	0,23	27	45%	75%	6.253,01
Distribuição acumulada								
10%	3.696,48	470,06	0,44	0,12	20,59	0,36	0,66	4.970,99
20%	3.888,40	565,39	0,47	0,13	21,26	0,37	0,67	5.107,35
30%	4.036,09	677,72	0,50	0,15	21,95	0,38	0,68	5.252,06
40%	4.220,14	772,57	0,54	0,16	22,86	0,39	0,69	5.393,63
50%	4.382,09	862,13	0,57	0,17	23,49	0,40	0,70	5.545,33
60%	4.535,26	949,65	0,60	0,18	24,20	0,41	0,71	5.678,75
70%	4.684,46	1.025,51	0,63	0,19	24,90	0,42	0,72	5.809,58
80%	4.837,78	1.116,03	0,67	0,21	25,58	0,43	0,73	5.978,22
90%	4.987,29	1.212,73	0,71	0,22	26,34	0,44	0,74	6.101,57
100%	5.139,42	1.299,92	0,75	0,23	27,00	0,45	0,75	6.250,63

Fontes: CHERNICHARO, 2007; COSTA, 2006; EMBASA, 2009; GRUPO FOCKINK, 2009; SOUZA, et al., 2009

Como mostra a Tabela 08 o potencial elétrico do biogás produzido na ETE de Madre de Deus foi calculado a partir das equações aplicáveis aos dados de entrada, para cada um dos

cenários ou “rodadas”, gerando 1.000 resultados aleatórios, distribuídos por frequência acumulada.

Tabela 08 – Variáveis de saída pelo Método de Monte Carlo em distribuição de frequência acumulada

Variáveis	S	DQO _{CH₄}	K _t	Q _{CH₄}	Q _{CH₄líquido}	Q _{biogás}	PE
	g/m ³	Kg/dia	-	m ³ /d	m ³ /d	m ³ /d	KW
10%	187,05	729,29	2,61	275,79	169,63	238,80	19,21
20%	230,73	941,11	2,61	359,20	212,91	303,61	24,25
30%	265,93	1121,08	2,62	426,32	249,36	355,89	28,02
40%	305,57	1235,26	2,62	469,73	281,66	404,91	32,45
50%	340,34	1380,53	2,63	527,06	316,88	461,07	37,27
60%	386,56	1556,22	2,64	593,87	359,60	511,62	41,07
70%	436,20	1787,95	2,64	680,21	405,28	577,64	46,31
80%	493,36	2035,65	2,65	770,94	460,57	660,98	53,27
90%	566,15	2375,71	2,66	906,04	541,20	776,57	63,02
100%	752,03	3553,60	2,66	1351,73	833,12	1245,32	109,20

Analisando a curva de distribuição da Figura 08, observa-se que a uma probabilidade de 50% o potencial elétrico gerado por 461m³/dia de biogás na ETE de Madre de Deus equivale a aproximadamente 37KW.

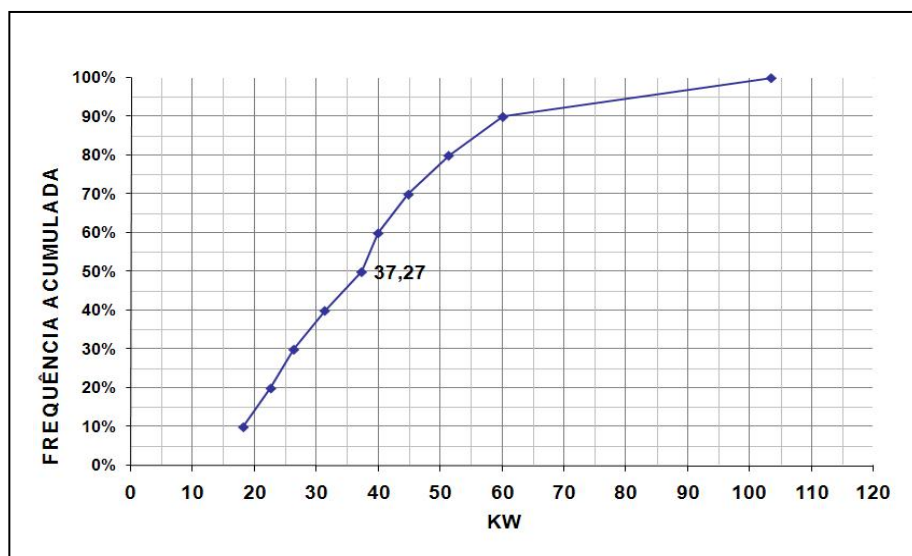


Figura 08 – Gráfico de distribuição do potencial elétrico por frequência acumulada

Para o custo do KWh de R\$ 0,36641 a redução da demanda por energia em 37KWh significaria uma economia de R\$ 13,66 por hora ou R\$ 119.627,44 ao ano.

Baseado na população de Madre de Deus atendida com esgotamento sanitário conclui-se que o potencial elétrico gerado por habitante é de 1,3Wh. Se considerada a produção de biogás de todo o esgoto tratado pela Embasa, cuja população total atendida com o serviço é de 2,96 milhões, seria gerado aproximadamente de 4MWh. Em um ano a energia produzida seria de 31.588MWh.

Admitindo o consumo médio mensal de uma residência com quatro indivíduos em 80KWh, estima-se que a energia elétrica gerada na ETE de Madre de Deus (26.850KWh/mês) seria suficiente para prover, aproximadamente, 335 famílias, enquanto que todo o esgoto tratado pela Embasa (2.596.246KWh) forneceria eletricidade à 32.453 famílias.

É importante salientar que os resultados foram obtidos baseados em equipamentos fabricados preferencialmente para atendimento às atividades desenvolvidas no meio rural, tais como o tratamento de excremento de animais, e que podem ser necessários ajustes para atendimento ao setor de saneamento.

Na Sabesp, por exemplo, o projeto envolvendo as cinco maiores estações de tratamento de esgoto da Grande São Paulo – Barueri, Suzano, ABC, São Miguel Paulista e Parque Novo Mundo – demonstrou que um esgoto com vazão de 37.100m³/dia poderá gerar 2,8MWh. A produção de biogás se todo o esgoto da Grande São Paulo fosse tratado por digestão anaeróbia equivaleria a 270.212m³/dia, correspondendo a 20.820MWh (COSTA, 2006).

4.2. ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a determinação da viabilidade econômica foi avaliado o potencial elétrico da ETE de Madre de Deus. As premissas a seguir subsidiaram os cálculos dos indicadores econômicos.

- Foi considerada a potência elétrica de 37KW correspondente à mediana dos resultados obtidos com a simulação de Monte Carlo;
- A redução de custo com energia elétrica foi considerada como receita do projeto, correspondendo a R\$ 119.627,44.

- Os custos de O&M corresponderam a R\$ 41.765,88 e foram distribuídos uniformemente durante os anos do projeto;
- Estimou-se 9% de aumento na taxa de determinado insumo, conforme praticado em projetos desta natureza (GOMES, 2005);
- O tempo de vida útil do gerador é de 4 anos ou 32.000 horas;
- Adotou-se a taxa de juros de 12% ao ano;

A partir dos valores calculados, verifica-se que o tempo de recuperação do capital ou *payback* será atingido em 2,3 anos. Para um tempo de vida útil de 4 anos o investimento mostrou-se viável.

O índice relação B/C para o valor presente encontrado é igual a 3,55, indicando que as receitas atualizadas são maiores que os custos atualizados, portanto, viável.

A TIR para o investimento é de 61,7% ao ano, o que indica excelente rentabilidade do capital investido, já que supera a taxa de juros praticada.

Cabe destacar que a viabilidade do investimento foi demonstrada para todos os indicadores analisados. No entanto, é possível inferir que os resultados teriam desempenho superior caso o saneamento fosse descentralizado. Tal modelo implicaria em menor diluição do esgoto e reduziria o consumo de energia com o transporte de água pela rede de abastecimento, por conseguinte, as perdas no processo.

Considerando o potencial de geração que corresponde a 31.588MWh para o Estado da Bahia conclui-se que haveria uma economia de 51% no custo de energia elétrica com esgoto já que em 2007 os gastos corresponderam a 62.109MWh.

Analogamente ao projeto implantado na Sabesp, o investimento apresentou-se viável com gerador a biogás. O experimento com microturbina manteve o fluxo de caixa negativo pelo alto investimento inicial e custos envolvidos com operação e manutenção (COSTA, 2006).

A implantação de um projeto sustentável de energia elétrica possibilitará a ampliação do uso de fontes renováveis reduzindo a emissão de gases nocivos à atmosfera. Além disso, a melhoria da eficiência energética no saneamento contribuirá com a universalização do serviço e preservação dos mananciais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O estudo comprovou o potencial energético dos esgotos afluentes à ETE de Madre de Deus. A viabilidade econômica do investimento foi demonstrada através dos resultados obtidos pelos indicadores analisados. O retorno ocorrerá em 2,3 anos para um tempo de vida útil do equipamento de 4 anos. A relação B/C é maior do que 1 e a TIR é superior à taxa de juros de referência.

A aplicação do método estocástico para cálculo do potencial energético do biogás buscou reduzir as incertezas, baseando-se nos resultados à probabilidade de 50% da distribuição por frequência acumulada ou mediana.

O aproveitamento do biogás no saneamento poderá melhorar o balanço energético do setor reduzindo o custo de energia elétrica, atualmente representando 2% do total de despesas com eletricidade no país.

Extrapolando o resultado para todos os esgotos tratados pela EMBASA seria possível fornecer eletricidade mensalmente a 32.453 famílias. A economia da empresa com energia elétrica no ano chegaria a 51% ao ano.

Além dos benefícios econômicos mencionados, a implementação de um projeto sustentável de geração de energia elétrica propiciará o uso de fontes alternativas limpas, renováveis e ambientalmente aceitáveis.

A redução das emissões de metano contribuirá com a mitigação do efeito estufa responsável pelo aquecimento global.

O tratamento e destinação adequados dos esgotos evitarão a proliferação de doenças e a poluição do meio ambiente, promovendo a saúde e a qualidade de vida da população.

A pesquisa evidenciou que os esgotos constituem-se em um potencial energético, portanto, recomenda-se:

- A aplicação do estudo e a implementação do projeto em outras estações de tratamento;
- O investimento da receita do projeto na otimização dos processos de abastecimento e tratamento, buscando minimizar as perdas físicas e o desperdício energético, e na universalização do serviço;
- A racionalização do consumo de água;
- O reuso, adequando a qualidade da água ao fim a que se destina.

REFERÊNCIAS

- ALVES, João Wagner Silva. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos**. 2000. 165 f. Dissertação (Mestrado em Energia), PIPGE/USP, São Paulo, 2000. Disponível em: <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/docs/artigos_dissertacoes/ingrid_alves.pdf>. Acesso em: 05 Jul. 2009.
- AMBIENTE BRASIL. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/artigos_energia/biodigestores.html>. Acesso em: 10 out. 2009.
- ANDREOLI, et al.. Secagem e higienização de lodos com o aproveitamento do biogás. In: CASSINI, Sérgio Túlio (coordenador). **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Vitória, ES: PROSAB, 2003. p. 121-165.
- ÁVILA, Salvador. et al. **Sustentabilidade na indústria de bioenergia**. In: BIODIESEL. Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2007/desenvolvimento/28.pdf>. Acesso em 15 Out. 2008.
- BASSOI, Lineu José; GUAZELLI, Milo Ricardo. Resíduos Sólidos: Características e Gerenciamento. In: JR, Arlindo Philippi (editor). **Saneamento, Saúde e Ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri, SP: Manole, 2004. Coleção Ambiental/USP. Vol. 1.
- BERNI, Mauro Donizeti; BAJAY, Sergio Valdir. Geração de energia e a digestão anaeróbica no tratamento de efluentes: estudo de caso na indústria de papel. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2003, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000001000003&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 10 out. 2009.
- CENBIO. **Biomassa é a energia do século 21**. Revista Brasileira de Bioenergia, São Paulo, Ano 1, nº 2, p. 18-21., Out. 2007. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/download/revista/RBB2.pdf>>. Acesso em: 8 ago. 2009.
- CENBIO. Nota Técnica VII – **Geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos urbanos e industriais**. Florianópolis, SC, 2001. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/notatecnica_vii.pdf>. Acesso em: 8 out. 2009.
- CENBIO. Nota Técnica VIII - **Biogás e o mercado de crédito de carbono**. São Paulo, SP, 2008. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/notatecnica_viii.pdf>. Acesso em: 8 out. 2009.
- CHERNICHARO, C. A. L.; Reatores Anaeróbios: princípio de tratamento de águas residuárias, v. 5. Belo Horizonte: UFMG – DESA, 2007.
- COELBA. Tabela de tarifas e preço final de energia elétrica. Resolução 806, de 14/04/09. Disponível em: <http://www.coelba.com.br/ARQUIVOS_ANEXO/Tarifa%20Grupo%20B%20dezembro2009;060109;20091201.pdf>. Acesso em: 9 Dez 2009.

COHIM et al. Perspectivas futuras: água, energia e nutrientes. In: GONÇALVES, Ricardo Francis (coordenador). **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Vitória, ES: ABES, 2009.

CORTEZ et al. Biodigestão de Efluentes. In: CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electro Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares (Organizadores). **Biomassa para energia**. Campinas, SP: UNICAMP, 2008.

COSTA, David Freire da, **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194f. Dissertação (Mestrado em Energia), PIPGE/USP, São Paulo, 2006.

Disponível em:

<http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/docs/artigos_dissertacoes/costa.pdf>. Acesso em: 13 Maio 2009.

COUTO, Laércio; MÜLLER, Marcelo Dias. Florestas Energéticas no Brasil. In: CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electro Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares (Organizadores). **Biomassa para energia**. Campinas, SP: UNICAMP, 2008.

COUTO et al. **Vias de valorização energética da biomassa**. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 1, p.71-92, 2004.

DIAS, Reinaldo. **Gestão Ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade**. 1.ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estud. av.**, São Paulo, v. 21, n. 59, abr. 2007. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142007000100003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 9 ago. 2009.

EMBRAPA. **Plano Nacional de Agroenergia**. Secretaria de Produção e Agroenergia, República Federativa do Brasil, 2006. Disponível em:

<http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/docs/PAGE/MAPA/PLANOS/PNA_2006_2011/PLANO%20NACIONAL%20DE%20AGROENERGIA%202006%20-%202011-%20PORTUGUES.PDF>. Acesso em: 9 set. 2009

FIELD, Jim; SIERRA, Reyes. **Anaerobic granular sludge bed reactor technology**.

Disponível em: < <http://www.uasb.org/discover/agsb.htm#uasb>>. Acesso em: 18 out. 2009.

FOCKINK. Proposta Técnica/Comercial 2009

GOMES, Herber Pimentel. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise econômica de projetos**. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

IBGE. Contagem da População 2007. Disponível em:

<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/contagem.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2009.

IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000. Disponível em:
<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/pnsb.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2009.

IBGE. Produção da pecuária municipal - 2004. Disponível em:
<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=499&id_pagina=1>. Acesso em: 6 dez. 2009.

JR., Arlindo Philippi; AGUIAR, Alexandre de Oliveira. Controle Ambiental da Água. In: JR., Arlindo Philippi; ROMERO, Marcelo de Andrade; BRUNA, Gilda Collet (editores). **Curso de Gestão Ambiental**. Barueri, SP: Manole, 2005. Coleção Ambiental/USP. Vol. 2.

LEITE, Rogério Cezar de Cerqueira; LEAL, Manoel Régis L. V.. O biocombustível no Brasil. **Novos estud. - CEBRAP**, São Paulo, n. 78, jul. 2007. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000200003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 10 set. 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira 2009, Ano Base 2008**. Secretaria de Energia, República Federativa do Brasil, 2009. Disponível em:
<http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/ben/arquivos/resenha_2008/Resenha_energetica_-_2008-V2_-_16-04-09.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2009.

PIEROBON, Luiz Ricardo Pedra. **Sistema de geração de energia de baixo custo utilizando biogás proveniente de aterro sanitário**. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, 2007. Disponível em:
<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10867/000602082.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 25 abr. 2009.

POLPRASERT, Chongrak. **Organic Waste Recycling: Technology and Management**. 3rd Edition. London: IWA Publishing, 2007.

ROBRA, Sabine; OLIVEIRA, Ana M. de; CRUZ, Rosenira S. da; NETO, José A. de Almeida. **Tecnologia e potencial de produção de energia a partir da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos na Bahia**. Bahia Análise & Dados, v. 18, n. 4, p. 621-633, jan./mar. 2009

SALOMON; Karina Ribeiro; LORA, Electo Eduardo Silva. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. Disponível em:
<http://florestasenergeticas.com/arquivos/p_estimativa_brasil_17864.pdf>. Acesso em: 28 set. 2009.

SASSE, Ludwig. **Decentralised Wastewater Treatment in Developing Countries**. India: Bremen Overseas Research and Development Association (BORDA), 1998.

SNIS. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2007. Brasília: MCIDADES.SNSA, 2009.

SOUZA et al. Determinação de metano dissolvido em efluentes de reatores UASB: identificação da perda de potencial energético e das emissões de gás de efeito estufa. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Recife. Trabalhos Técnicos. Recife: ABES, 2009.

WHO. Health Topics Sanitation. Disponível em: <<http://www.who.int/topics/sanitation/en/>>
Acesso em: 25 nov. 2009.