UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DOS PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO PARA CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Fabiano Sutter de Oliveira

Rio de Janeiro

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO PARA CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

Fabiano Sutter de Oliveira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Orientador(es): Estevão Freire
Maria José de Oliveira Cavalcanti Guimarães

Rio de Janeiro

Agosto de 2013

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO PARA CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

Fabiano Sutter de Oliveira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DOS PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUIMICOS, ESCOLA DE QUÍMICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

Orientada por:

_____

Estevão Freire, D. Sc.

_____

Maria José de Oliveira Cavalcanti Guimarães, D. Sc.

Aprovada por:

_____

André Lermontov, D. Sc. - Grupo Águas do Brasil

_____

Eliana Mossé Alhadeff, D. Sc. - EQ/UFRJ

_____

Silvio Carlos Anibal de Almeida, D. Sc. - Poli/UFRJ

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Agosto de 2013

Oliveira, Fabiano Sutter

Avaliação do Potencial de Utilização do Biogás Gerado em Estação de Tratamento de Esgoto para Conversão em Energia: UFRJ/EQ, 2013.

XIV, 116 páginas

Orientador: Estevão Freire e Maria José de Oliveira Cavalcanti Guimarães

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro/ Escola de Química – Programa de Pós-graduação em Tecnologia em Processos Químicos e Bioquímicos, 2013.

1. Biogás. 2. Tratamento. 3. Análise Econômica. I. Freire, Estevão, Guimarães, Maria José de Oliveira Cavalcanti, II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.

À minha querida família, pelo amor dedicado e pelo apoio sempre presente em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me permitiu e deu coragem e fé necessárias para atingir o meu objetivo.

Aos professores Maria José Oliveira Cavalcanti Guimarães e Estevão Freire pela paciência e companheirismo.

A Águas do Imperador pelo apoio durante o trabalho.

Aos meus amigos que me apoiaram nos diversos estágios durante esta jornada, em especial, ao amigo André Lermontov.

A todos os mestres e doutores com os quais tive contato durante a redação do presente trabalho.

A Edilene Branco que me ajudou na formatação.

Agradecimento mais do que especial aos meus pais Mário e Thereza (*in memorian*) e aos meus irmãos Rafael, Luciano, Tânia e Luciane pelo apoio incessante.

Resumo da Dissertação apresentada ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, da Escola de Química/UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO PARA CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

Fabiano Sutter de Oliveira

Agosto/2013

Orientadores: Estevão Freire
Maria José de Oliveira Cavalcanti Guimarães

Programa: Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos

O biogás formado na etapa de digestão anaeróbica de esgoto nas estações de tratamento representa uma fonte alternativa eficiente de energia quando comparada às fontes energéticas fósseis utilizadas. Apesar do potencial de utilização do biogás, no Brasil, são poucas as práticas de sucesso no emprego do biogás na geração de energia elétrica. Existem poucos incentivos governamentais para a utilização da biomassa em geral no país, além da inexistência de legislação direcionada ao tema, bem como tecnologias disponíveis. Esta dissertação teve como objetivo avaliar o potencial energético da estação de tratamento de esgoto de Palatinato, localizada em Petrópolis, onde hoje todo o biogás produzido é queimado em *flares*. Desta forma, duas tecnologias (motogerador e microturbinas) foram analisadas comparativamente em termos de vantagens e desvantagens. Uma análise econômica foi feita empregando indicadores financeiros (Fluxo de Caixa, Valor Presente Líquido, Taxa interna de retorno e *Payback*), de modo a analisar a viabilidade de implementação de cada tecnologia. Os resultados financeiros apontaram para o emprego da tecnologia de motogerador, ocorrendo a recuperação do capital investido em tempo inferior a 1 ano. Entretanto, deve-se considerar o seu *overhaul* (1/8 da microturbinas) e as elevadas emissões de compostos nitrogenados, quando utilizada esta tecnologia.

Abstract of Thesis presented to EQ/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EVALUATION OF THE POTENTIAL USE OF BIOGAS GENERATED IN SEWAGE TREATMENT PLANT FOR CONVERSION INTO ELECTRICITY

Fabiano Sutter de Oliveira

august/2013

Advisors: Estevão Freire
Maria José de Oliveira Cavalcanti Guimarães

The biogas formed in the stage of anaerobic digestion of sewage treatment plants represents an efficient alternative source of energy when compared to the fossil energy sources. Despite the potential use of biogas, there are in Brazil few successful practices in the use of biogas in electricity generation. There is in general few government incentives for the use of biomass in the country, besides the absence of legislation directed to the theme and available technologies as well. This work aimed to evaluate the energy potential of the Palatinate sewage treatment plant, located in Petrópolis, where all the biogas is today burned in flares. Thus, both technologies (power generator and microturbines) were comparatively analyzed in terms of advantages and disadvantages. An economic analysis has been carried out using financial indicators (Cash Flow, Net Present Value, Internal Rate of Return and Payback), in order to contemplate the feasibility of implementing each technology. The financial results point to the use of technology motogenerator with recovery of invested capital in less than one year. However, one must consider its overhaul (1/8 of microturbines) and high emissions of nitrogen compounds, whenever this technology is picked out.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 16
1. Introdução e Objetivos 16
1.1. - Introdução 16
1.2 – Objetivos 19
1.2.1 – Objetivo geral 19
1.2.2 – Objetivos específicos 19
1.3 – Estrutura do trabalho 20
CAPÍTULO 2 21
2. Recursos hídricos: Caracterização, Usos e Tratamento 21
2.1 - A água e o meio ambiente 21
2.2 – O problema da poluição 23
2.3 – Águas residuárias 25
2.3.1 - Características gerais 25
2.3.2 – Parâmetros de controle 26
2.3.2.1 – Temperatura 26
2.3.2.2 – Cor 27
2.3.2.3 – Odor 27
2.3.2.4 – Turbidez 27
2.3.2.5– Sólidos 28
2.3.2.6 – Matéria Orgânica 28
2.3.2.7 – Carbono Orgânico Total (COT) 29
2.3.2.8 – Nitrogênio 30
2.3.2.9 – Fósforo 30
2.4 – Tratamento de esgoto 31
2.4.1 – Tratamento de esgoto no Brasil 31
2.4.2 – Tipos de tratamento 34
2.4.2.1 – Tratamento preliminar 35
2.4.2.2 – Tratamento primário 36
2.4.2.3 – Tratamento secundário 37
CAPÍTULO 3 40
3. Produção e Aproveitamento do Biogás 40
3.1 - Biogás 40

3.2 - Métodos de cálculo de produção de biogás 43
3.3 – Tratamento do Biogás 45
3.4 - Tecnologias de Conversão do Biogás em Energia Elétrica 51
3.4.1 – Turbinas a gás 54
3.4.2 – Microturbinas a gás 54
3.4.3 – Motores de combustão interna 55
3.4.4 – Turbinas a vapor 56
3.5 - Biodigestores 57
3.5.1 – Tipos de biodigestores 60
3.5.1.1 – Indiano 60
3.5.1.2 – Chinês 60
3.5.1.3 – Brasileiro 61
3.5.1.4 – Canadense 61
3.6 - Aterros Sanitários 62
CAPÍTULO 4 72
4. Análise Econômica 72
4.1 – Introdução 72
4.2 – Conceitos de Finanças Corporativas 75
4.3 – Taxa Mínima de Atratividade 77
4.4 – Valor Presente Líquido 77
4.5 – Taxa Interna de Retorno (TIR) 79
4.6 – Payback 80
CAPÍTULO 5 82
5. Estudo de caso: ETE Palatinato 82
5.1 – Histórico 82
5.2 – Tratamento 84
5.3 – Tarifação e consumo energético 86
5.4 – Metodologia 89
5.5 – Cálculo dos componentes de Fluxo de Caixa 90
5.5.1 – Geração de Energia Elétrica com uma Microturbina 90
5.5.2 – Geração de Energia Elétrica com um Grupo Motogerador 91
5.6 – Custos de Operação e Manutenção (O&M) 92
5.6.1 - Custos de Operação e Manutenção - Microturbina 92
5.6.2 - Custos de Operação e Manutenção – Grupo Motogerador 93
5.7 – Quadro Comparativo – Custo de geração 94
5.8 – Discussão dos Resultados 94
CAPÍTULO 6 104

Considerações Finais 104
CAPÍTULO 7 106
Sugestões para trabalhos futuros 106
BIBLIOGRAFIA 107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Variação da temperatura do planeta entre 1860 e 2000. 16
Figura 2.1 - Sequencia metabólica e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbica. 38
Figura 3.1 - Poder calorífico inferior em função do percentual de metano. 50
Figura 3.2 - Viabilização para aproveitamento do biogás. 52
Figura 3.3 - Sistema de captação e geração de energia elétrica em aterro sanitário. 64
Figura 3.4 - Emissões de metano entre 2000 e 2020 em $MtCO_2eq$ - estimativa 66
Figura 4.1 - Representação de um Diagrama de Fluxo de Caixa. 76
Figura 5.1 - Diagrama de Blocos da Planta de Tratamento ETE Palatinato. 86
Figura 5.2 - *Payback* das Tecnologias 97
Figura 5.3 - Comparação de O&M considerando *overhaul*. 102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Níveis de atendimento de água e esgoto por região do Brasil em 2009.....32
Tabela 2.2 - Níveis de atendimento de água e esgoto por região do Brasil em 2000 e 2008...33
Tabela 3.1 - Características e composição do biogás em função da fonte geradora. 40
Tabela 3.2 - Alguns combustíveis e valores de poder calorífico.....41
Tabela 3.3 – Necessidade de remoção de compostos gasosos conforme a utilização.....46
Tabela 3.4 - Equivalência energética entre o biogás e outras fontes de energia. 47
Tabela 3.5 - Técnicas de remoção de impurezas do biogás.....48
Tabela 3.6 - Poder calorífico inferior de vários tipos de gases.....50
Tabela 3.7 - Composição típica do biogás produzido e purificado. 51
Tabela 3.8 - Características de algumas tecnologias de conversão de biogás.....53
Tabela 3.9 - Comparação entre as tecnologias de conversão de energia.....56
Tabela 3.10 - Destino final dos resíduos – Brasil 1998/2008.....63
Tabela 3.11 - Geração *per capita* de lixo por região no Brasil. 63
Tabela 3.12 - Emissões de metano dos aterros – 1990-2000 (MtCO2eq).....70
Tabela 3.13 - Reduções de emissões esperadas com projetos MDL. 71
Tabela 3.14 - Emissões projetadas de metano dos aterros – 2005-2020 (MtCO2eq). 71
Tabela 5.1 - Custo dos equipamentos, materiais e acessórios – Microturbina.....91
Tabela 5.2 - Custo dos equipamentos, materiais e acessórios – Grupo Motogerador.....92
Tabela 5.3 - Operação e Manutenção - Microturbina.....92
Tabela 5.4 - Manutenção programada – Microturbina.....93
Tabela 5.5 - Operação e Manutenção – Grupo Motogerador.....93
Tabela 5.6 - Quadro Comparativo das Tecnologias. 94
Tabela 5.7– Fluxo de Caixa – Microturbinas. 95
Tabela 5.8 – Fluxo de Caixa – Motogeradores.....96
Tabela 5.9 - Comparação de 10 anos de Operação e manutenção (O&M) da microturbina com *overhaul* do motogerador (em R$). 101
Tabela 5.10 – Relação entre CAPEX, VPL e kWh mensal e 10 anos.....103

LISTA DE SIGLAS

% vol. - Percentual em Volume
°C - Graus Centigrados
µm - Micrômetro
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
APU - *Airbone Power Unit*
C/N - Relação Carbono/Nitrogênio
CAPEX - *Capital Expenditure*
CNTP – Condições Normais de Pressão e Temperatura
COT - Carbono Orgânico Total
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO - Demanda Química de Oxigênio
ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
FC - Fluxo de Caixa
FGV - Fundação Getulio Vargas
GEE - Gases do efeito estufa
GLP - Gás Liquefeito de Petróleo
GWP - *Global Warming Potential*
hab - habitantes
IAWQ - *International Association on Water Quality*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGP- M - Índice Geral de Preços do Mercado
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
Kcal/Kg - Quilocaloria por Kilo
Kg/Nm^3 - Quilograma por Newton metro cúbico
KJ - Quilo Joule
KWh - Quilowatt hora
MDL - Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MJ/m^3 - Megajoule/metro cúbico
MJ/Nm^3 - Megajoule por Newton metro cúbico
$MtCO_2eq$ - milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente
MW - Megawatt
O&M - Operação e Manutenção
OMS - Organização Mundial de Saúde
PAC - Programa de Aceleração do Crescimento
PCI - Poder Calorífico Inferior
PEAD - Polietileno de Alta Densidade
pH - Potencial Hidrogeniônico
PLANSAB - Plano Nacional de Saneamento Básico
PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
ppm - Partes por milhão
PRODES - Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas
RAFA - Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente

RDO - Resíduos Domiciliares
RPU - Resíduos Públicos
SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TIR - Taxa Interna de Retorno
TMA - Taxa Mínima de Atratividade
TWh - Terawatts hora
UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blancket*
USEPA - *United States Environmental Protection Agency*
VPL - Valor Presente Líquido

CAPÍTULO 1

1. Introdução e Objetivos

1.1. - Introdução

No inicio do século XIX, a Revolução Industrial trouxe diversos benefícios para a sociedade, tais como meios de transporte mais rápidos, aumento da produtividade industrial com o uso das máquinas em substituição do trabalho manual e de certa forma, provocou o aumento da expectativa de vida das populações. Entretanto, com o advento desses novos paradigmas, tem havido uma demanda crescente por energia. Com essa demanda vieram os problemas que causaram diversos impactos ambientais, como a poluição dos rios, do ar e solo. A partir de 1970, começou a ser diagnosticado e analisado o chamado efeito estufa, ou também denominado de aquecimento global. Esse aquecimento está ligado ao acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, provenientes das atividades industriais. Dentre outros, os principais gases são o metano e o dióxido de carbono. Na Figura 1.1, pode-se notar o constante aumento da temperatura do planeta (eixo x) desde o inicio do século 19 até o ano de 2010.

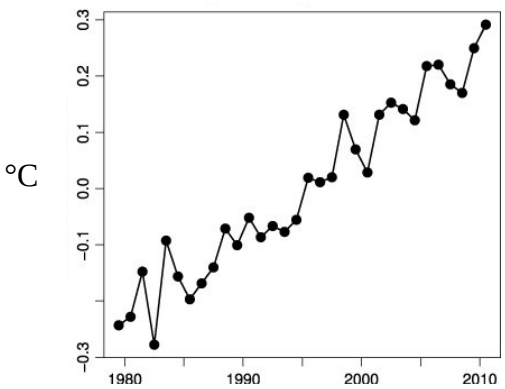

Figura 1.1 - Variação da temperatura do planeta entre 1860 e 2000.
Fonte: Foster, 2011

O Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas, estabelecido em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) estima que a temperatura global média tenha subido em

0,6°C no século XX e poderá se elevar em mais 1°C até 2030. Até 2090, a projeção indica aumento de 4°C, caso medidas corretivas e de prevenção não sejam adotadas.

Energia, ar e água são essenciais para o ser humano. A busca por novas fontes de energia se faz necessária diante do constante aumento de demanda por parte da sociedade. Exemplo disso é o consumo de água que tem aumentado nos últimos anos. A China, por exemplo, tem 21% da população mundial e possui apenas 7% de água doce disponível. A planície do norte, onde localiza-se o rio Amarelo, é uma das regiões mais populosas do pais e encontra-se em escassez hídrica. Lá vivem aproximadamente 450 milhões de pessoas e seu volume *per capita* é de apenas 500 metros cúbicos, aproximado ao encontrado na Argélia (POSTEL, 2004).

Atualmente, os padrões utilizados de produção e consumo de energia estão baseados em fontes fósseis, gerando um fator complicador: as emissões de poluentes locais e o consequente aumento do efeito estufa. O dióxido de carbono é o indicador antropogênico mais utilizado para evidenciar esse aumento. A concentração global desse gás tem aumentado desde a fase pré-industrial que era em torno de 280 ppm[1]. Em 2005, esse valor era de 379 ppm. A taxa anual de crescimento da concentração desse gás foi maior no período de 1995-2005, com média de 1,9 ppm por ano (IPCC, 2007).

No Brasil, as energias renováveis representam aproximadamente 42% do consumo total enquanto que no mundo inteiro representam 15%. O país possui uma marcante matriz energética elétrica baseada no uso da força hidráulica proveniente da vasta rede de rios que cobre todo o país. A energia hidráulica é responsável por 17% de todas as fontes renováveis de energia do mundo e o Brasil é um dos cinco países que é responsável por mais da metade da produção mundial. Diante disso, a política de estimulo a outras fontes de energia ainda é tímida, quando comparada ao incentivo em outros países; porém o Brasil tem uma posição impar para se afirmar como um dos líderes mundiais em energia.

Existem no Brasil alguns exemplos de inovação na área energética: produção de etanol a partir da cana de açúcar e do carvão vegetal, a partir das plantações de

[1] Ppm (partes por milhão) ou ppb (partes por bilhão 1 bilhão = 1.000 milhões) é o quociente do número de moléculas do gás estufa e o número total de moléculas de ar seco. Por exemplo, 300 ppm significa 300 moléculas de gás estufa por milhão de moléculas de ar seco.

eucaliptos, além da cogeração de energia elétrica, fazendo uso do bagaço da cana de açúcar e o emprego da biomassa das indústrias de papel e celulose. Outra fonte de energia que vem sendo estudada é o uso do metano, produzido nas estações de tratamento de esgoto, para geração de energia elétrica.

Nos tempos atuais de crise energética e constante busca de novas fontes, o tratamento de esgoto pode contribuir de forma eficiente na proteção ambiental, oferecendo um combustível alternativo.

Nesse contexto, ainda há muito que se explorar. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico houve aumento na proporção de domicílios com acesso à rede de esgoto que passaram de 33,5%, em 2000, para 45,7%, em 2008. No entanto, apenas na Região Sudeste mais da metade dos domicílios (69,8%) tinham acesso à rede geral. A segunda região em cobertura do serviço foi a Centro-Oeste (33,7%), com resultado próximo ao da Região Sul (30,2%). Os percentuais das regiões Nordeste e Norte foram 29,1% e 3,5%, respectivamente (PNSB 2008).

Diante disso, existe a real necessidade de implementar políticas públicas voltadas para o saneamento para que este potencial seja utilizado na sua totalidade. Em uma simples construção de raciocínio, quanto maior o volume coletado e tratado de esgoto, maior será a produção média de biogás e, portanto, menor será o consumo de energia elétrica, considerando o ganho ambiental com o esgoto tratado. O saldo energético pode ser revertido em favor do balanço financeiro da unidade, visto que poderia, por exemplo, alimentar o sistema de iluminação nos arredores da própria estação de tratamento.

Neste cenário, conforme já concluíram alguns pesquisadores, espera-se que para a sobrevivência do homem a sua atenção esteja direcionada ao reaproveitamento dos recursos escassos, em particular da água, bem como a sua proteção, recuperação e reuso. Políticas nacionais e internacionais reconhecem que há necessidade de priorizar tal assunto. Sendo assim, espera-se que até 2015, a proporção de pessoas sem acesso à água potável e saneamento básico seja reduzida até a metade (ARNAL, 2009).

Portanto, a busca de novos processos tecnológicos torna-se necessária, principalmente quando aplicados aos “sub-produtos” de processos convencionais, como é o caso do biogás proveniente do tratamento secundário nas estações de tratamento de esgoto, até então, sem muita importância na matriz energética.

Neste cenário, o governo do estado do Rio de Janeiro criou através da Lei n° 6361, de 18 de dezembro de 2012, a Política Estadual de Gás Natural Renovável (GNR). Tal lei tem como finalidade priorizar a utilização do biogás gerado em aterros sanitários e aterros controlados. Além disso, permite ainda que a captação do gás natural seja realizada de outras fontes, entre elas estão as estações de tratamento de esgoto. Com abrangência nacional já estão liberadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) normas direcionadas para a geração distribuída de até 1 MW, além da previsão de investimento do PAC 2 para o setor de saneamento (2011-2014) de R$ 45 Bi, sendo aproximadamente 30% para esgoto (PLANSAB, 2011)

No Brasil não faltam experiências e projetos que utilizam o biogás como fonte de energia. Na ETE Vieiras dos Montes, o biogás é utilizado para secagem do lodo; na ETE Franca, utilizam para combustível veicular; na ETE Arrudas e ETE Ouro Verde, para a geração de energia elétrica.

Porém, ainda existem muitos entraves no Brasil: faltam dados operacionais nas estações; falta conhecimento das tecnologias por parte do setor como um todo; existem, apesar das normas, problemas relacionados à entrega de excedente à concessionária de energia, entre outros.

1.2 – Objetivos

1.2.1 – Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade da utilização do biogás gerado na estação de tratamento ETE Palatinato e sua conversão em energia elétrica, comparando as tecnologias disponíveis no mercado.

1.2.2 – Objetivos específicos

- analisar as tecnologias disponíveis para produção de energia elétrica, a partir do biogás;
- analisar a viabilidade econômica entre as tecnologias mais promissoras, além da atratividade dos projetos.

1.3 – Estrutura do trabalho

O presente trabalho apresenta-se estruturado em sete capítulos, incluindo este:

Cap. 2 – Recursos Hídricos: Caracterização, Usos e Tratamento - Neste capitulo será apresentada uma revisão bibliográfica que abrangerá os principais conceitos relacionados ao tratamento de esgoto e os principais parâmetros de controle, bem como exposição do tratamento de esgoto no Brasil;

Cap. 3 – Produção e Aproveitamento do Biogás - Neste capítulo serão abordados tópicos relacionados ao biogás, entre eles, a sua formação e composição, além do seu tratamento e aproveitamento energético. O capitulo será complementado conceituando biodigestores e aterros sanitários;

Cap. 4 – Análise Econômica - Neste capítulo é apresentada a terminologia econômica empregada neste trabalho, bem como os conceitos utilizados na análise dos projetos;

Cap. 5 – Estudo de caso – ETE Palatinato: Além de apresentar a estação de esgoto e o tipo de tratamento, o capitulo aborda a sua tarifação energética e o seu consumo de energia elétrica. São apresentados ainda os valores de investimento e de operação das tecnologias comparadas e os resultados são discutidos através da demonstração do fluxo de caixa e análise dos dados;

Cap. 6 – Considerações Finais

Cap. 7 – Sugestões: serão apresentadas algumas sugestões e medidas a fim de motivar estudos futuros sobre o tema;

No final, encontram-se relacionadas às referências bibliográficas pesquisadas para o desenvolvimento dessa dissertação.

CAPÍTULO 2

2. Recursos hídricos: Caracterização, Usos e Tratamento

2.1 - A água e o meio ambiente

A limitação dos recursos não renováveis foi abordada no século XVIII por Malthus que enunciou a lei de rendimentos decrescentes, onde diz que a terra se mantém fixa, a produção aumenta de forma aritmética e a população aumenta geometricamente. Outros trabalhos sobre disponibilidade de recursos são citados na literatura, sempre sinalizando que a Terra é finita e a demanda de recursos é constante (GRANATO, 2003).

Em 1972, foi publicado um relatório chamado de Relatório[2] *Meadows* que abordava o futuro da espécie humana na ótica de cinco variáveis: o estoque do capital industrial, a população, a poluição, a oferta de alimentos e a disponibilidade de recursos não renováveis. Concluíram que se as tendências atuais do crescimento da população mundial, industrialização, poluição, produção de alimentos e uso dos recursos naturais não mudarem, os limites ao crescimento seriam alcançados em 100 anos, aproximadamente. O resultado seria um súbito e incontrolável declínio tanto da população como também da capacidade industrial (MEADOWS *et al*. 1972).

Apenas 3% de toda água está na forma superficial, de extração fácil. Cabe, portanto, a preservação os recursos hídricos, evitando assim a contaminação do pouco que está disponível (VON SPERLING, 2005).

A baixa disponibilidade de água para uso antrópico mostra que ocorreu um declínio no volume *per capita* de água de qualidade satisfatória entre os anos de 1950 e 2000. Dentro ainda do estudo, pode-se observar que em regiões desenvolvidas tais como Europa e Estados Unidos, ocorreu uma maior conscientização ambiental e assim foram observados menores decréscimos (DI BERNARDO, 2008).

---

[2] Trata-se de um relatório encomendado em 1970 pelo Clube de Roma – uma associação de empresários e lideres políticos preocupados com o destino do mundo. Este estudo foi pedido a um grupo de pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), sob a coordenação de Dennis Meadows.

Durante a sua História, a Terra tem sofrido constantemente diversas interações deletérias proveniente de ações antropogênicas. Todos os resíduos são assimilados pelos ecossistemas nos quais são gerados (ODUM & ODUM, 1981 *apud* LERMONTOV, 2003).

O percentual de população atendida mundialmente por abastecimento de água potável aumentou de 79% (4,1 bilhões), em 1990, para 82% (4,9 bilhões) em 2000. No mesmo período, o acesso ao esgotamento sanitário aumentou de 55% (2,9 bilhões) para 60% (3,6 bilhões). Isso quer dizer que ainda 1/6 de toda a população mundial não tem acesso à água potável e aproximadamente 2,4 bilhões de pessoas não possuem instalações de esgoto adequadas (UNICEF, 2000).

O consumo médio de água no mundo é totalmente desproporcional variando entre 40 m^3/hab.ano na Etiópia e 2000 m^3/hab.ano nos Estados Unidos. Esse consumo é distribuído entre vários segmentos na sociedade, estando 69% na agricultura, 29% ao setor industrial e 10% em usos domésticos (DI BERNARDO, 2008).

Atualmente, trinta países já podem ser considerados deficientes em relação à disponibilidade de água. Desses, pode-se dizer que 20 países já sentem a falta de água; e é previsto que em 2020 o número de países com falta de água potável deva aproximar-se de 35. O quadro mais preocupante é que esse número aumentará para um terço da população, em 2025 (VAIRAVAMOORTHY, 2008).

O Brasil pode ser considerado privilegiado no quesito água, detendo 11,6% da água doce superficial do mundo, porém paradoxalmente, 70% dessa água encontra-se na região amazônica do país, habitada por menos de 5% de toda a população. A disponibilidade hídrica no Brasil varia entre valores maiores que 2500 m^3/hab.ano até regiões mais críticas com volumes menores que 1500 m^3/hab.ano (DI BERNARDO, 2008).

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) existem estimativas que aproximadamente 25 milhões de pessoas morram por ano devido a doenças transmitidas pela ingestão de água de péssima qualidade. No Brasil, cerca de 90% das internações hospitalares acusam como causa principal as doenças transmitidas pela água. Segundo a mesma agência, em um trabalho conjunto com o Fundo das Nações Unidas para a Infância, o número de residentes urbanos sem acesso à água de boa qualidade aumentou de 113 milhões em 1990 (5% da população urbana

mundial total) para 173 milhões em 2000 (6% da população urbana mundial total). Na Índia, por exemplo, 85% da população têm acesso à água para ingestão, porém apenas 20% desta água obedecem a padrões de segurança e de saúde, conforme preconizado na legislação de potabilidade local. Estima-se que em 2050, metade da Índia estará vivendo em áreas urbanas e enfrentará problemas relacionados á disponibilidade da água (VAIRAVAMOORTHY, 2008).

Estima-se que 42.000 pessoas morram toda semana no mundo devido às doenças relacionadas à baixa qualidade da água e ausência de saneamento. Entre 1990 e 2004, aproximadamente 1,2 bilhões de pessoas tiveram acesso às melhorias, entretanto, mais do que o dobro, ou seja, 2,6 bilhões ainda sofrem com a falta de coleta/tratamento de esgoto e construção de latrinas simples. Universalizar o acesso a sistemas de esgoto sanitário no mundo inteiro, segundo a Organização das Nações Unidas, significa investir 10 bilhões de dólares por ano durante duas décadas. O retorno para tal investimento, segundo a Organização Mundial de Saúde, é de US$ 7 de economia para cada dólar investido (DI BERNARDO, 2008).

2.2 – O problema da poluição

O avanço tecnológico gerou uma variedade imensa de produtos novos no mercado. Segundo TEIXEIRA (2004) mais de oito milhões de compostos já foram catalogados e caracterizados quimicamente. Entretanto, apenas uma fração destes é caracterizada do ponto de vista toxicológico.

Conforme VON SPERLING (2005), poluição é a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente prejudiquem a saúde, a segurança e o bem estar da população; que favorecem condições adversas às atividades sociais e econômicas; que afetem desfavoravelmente a biota e as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e que lancem matérias ou energias em desacordo com os padrões ambientais previstos em lei.

A Inglaterra foi um dos primeiros países, em função da Revolução Industrial, a desenvolver técnicas de medição e caracterização da poluição existente em um corpo hídrico. Surgiram nessa época também os primeiros processos de tratamento de águas residuárias. Essas técnicas foram difundidas para toda Europa, porém o desenvolvimento industrial está sendo mais rápido do que o desenvolvimento destes

processos. Consequentemente, gera-se um saldo desfavorável para os rios e a saúde humana (LERMONTOV, 2003).

Grande parte destes poluentes orgânicos é proveniente da indústria do refino de petróleo, na manufatura de produtos químicos, em indústrias de processamento têxteis e de papel, além de serem ainda encontrados nas indústrias de pesticidas, fertilizantes e detergentes e em efluentes de plantas de águas residuárias, onde o lançamento ocorre de forma incontrolada, lançando rejeitos perigosos e promovendo derramamentos acidentais. Estimativas apontam que foram gerados entre 330 e 570 milhões de toneladas de resíduos que são classificados como sendo perigosos, somente em plantas americanas, entre o período de 1900 e 1980. Referências mais recentes estimam mais de 280 milhões de toneladas desses resíduos anualmente, provenientes de aproximadamente 200.000 processos industriais. Apenas 3% deste volume são destruídos e o restante é lançado no meio ambiente, onde são acumulados, tornando-se parte integrante do mesmo (TEIXEIRA, 2004).

De uma forma geral, qualquer contaminação do meio ambiente causa preocupação. Porém, maior atenção tem sido dada à poluição hídrica, pois 70% da superfície terrestre são coberta por água e as suas propriedades e seu vapor controlam as condições climáticas que tornam possível a vida na Terra. Embora o volume de água seja imenso, uma baixa fração desse total está disponível para consumo. O homem dispõe de apenas 2000 km^3 de água doce (na forma de rios) para satisfazer as suas necessidades. É um cenário conflitante, pois do lado oposto, existe um crescimento populacional e sua alta demanda pela água de alta qualidade (TEIXEIRA, 2004).

De acordo com VON SPERLING (2005), é a qualidade da água que determinará o seu uso ou seu conjunto de usos, sendo este o único critério utilizado. A qualidade da água é determinada por diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos. Todos esses parâmetros estão referenciados em legislações como, por exemplo, a Portaria 2914, publicada em 2011 para padrão de potabilidade.

Em algumas regiões, o reuso está sendo considerado como sendo uma solução quando o suprimento de água não é suficiente para atender o aumento da demanda.

Além do ciclo da água no globo terrestre, ainda existem ciclos próprios onde a água tem as suas características iniciais alteradas. Entre eles, destacam-se as rotas

de formação de esgoto bruto ou água usada, onde a água utilizada sofre transformações na sua qualidade, vindo a constituir-se um despejo. Então, visando a remoção de poluentes, os despejos sofrem um tratamento antes de serem lançados no corpo receptor.

Segundo LERMONTOV (2003), é importante manter um monitoramento constante nos corpos hídrico a fim de obter informações. O monitoramento dita tendências da qualidade da água e são úteis para verificar o enquadramento das águas e o monitoramento qualitativo e quantitativo dos recursos hídricos é um poderoso instrumento que possibilita a avaliação da oferta hídrica, base para diversas decisões. A boa gestão dos recursos hídricos é um plano que contempla múltiplos usos deste recurso, sendo assim necessário o desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas de utilização, tratamento e recuperação de mananciais.

2.3 – Águas residuárias

2.3.1 - Características gerais

Comumente chamado de águas residuais, sendo estas de origem doméstica, ou com características bem próximas, geralmente com alta degradabilidade, os esgotos sanitários podem ser divididos em 4 grandes grupos:

- Sólidos em suspensão;
- Matéria Orgânica;
- Nutrientes;
- Organismos Patogênicos.

Quando lançados "*in natura"* em corpos receptores, ou seja, sem o devido tratamento, provocam uma série de efeitos deletérios no meio ambiente. Entre esses efeitos, pode-se destacar a eutrofização que é promovida pelo lançamento continuo de efluentes ricos em nitrogênio e fósforo, em rios e lagos.

Os esgotos domésticos contêm em sua grande parte 99,9% de água. O restante contém sólidos, sendo divididos em sólidos inorgânicos e orgânicos. Desta

composição de sólidos, estes podem ser divididos em 2 grupos: suspensos e dissolvidos. Além disso, fazem parte da composição de esgotos os microrganismos. Devido a essa fração, que corresponde a 0,1% de toda a composição, há necessidade de realizar um tratamento nos esgotos.

O termo “esgoto” refere-se a águas residuárias produzidas por uma comunidade e basicamente podem originar-se de duas diferentes fontes: esgoto doméstico, originário de cozinhas, banheiros e esgotos industriais, provenientes de indústrias. A sua composição e seu volume podem variar consideravelmente de cidade para cidade, basicamente dependendo de aspectos econômicos, comportamento social, tipo e número de indústrias localizadas em determinada bacia hidrográfica, condições climáticas e consumo de água potável. Discussões em torno do manuseio apropriado de esgoto remontam ao século IV antes de Cristo, através da chamada “Constituição Ateniense”, escrita por Aristóteles. Após milhares de anos, o descarte no meio ambiente é ainda uma prática comum, especialmente em países em desenvolvimento (SEGHEZZO, 1998).

2.3.2 – Parâmetros de controle

Para caracterizar um esgoto, devem-se determinar parâmetros que podem ser divididos em três grupos: biológicos, físicos e químicos. As principais características físicas de um esgoto podem ser divididas em quatro parâmetros: temperatura, cor, odor e turbidez. As características químicas do esgoto estão divididas em grupos maiores e de maior complexidade, conforme adaptação de ARCEIVALA (1981), QASIM (1985), METCALF & EDDY (1991): Sólidos, Matéria orgânica, Nitrogênio total, Fósforo e outros parâmetros como pH, alcalinidade, cloretos, óleos e graxas (VON SPERLING, 2005).

2.3.2.1 – Temperatura

A temperatura influencia na solubilidade dos gases e na velocidade das reações. Uma elevação de temperatura do corpo hídrico reduz a solubilidade de oxigênio. Quanto maior a temperatura, menor será a taxa de oxigênio dissolvido no meio. A temperatura desempenha um papel fundamental no controle do meio

aquático, condicionando as influências de uma série de parâmetros físico-químicos. Em geral, à medida que a temperatura aumenta a viscosidade, a tensão superficial, compressibilidade, calor especifico, constante de ionização e calor latente de vaporização diminuem, enquanto que a condutividade térmica e a pressão de vapor aumentam. Os organismos aquáticos possuem limites de tolerância térmica superior e inferior, temperaturas ótimas para crescimento, temperatura preferida em gradientes térmicos e limitações de temperatura para migração, desova e incubação de ovos (LERMONTOV, 2003).

2.3.2.2 – Cor

Pode variar de acordo com a idade do esgoto. Para esgoto recente, pode ser ligeiramente cinza, sendo cinza escuro ou preto para esgotos mais sépticos. Efluentes de diversas indústrias, tais como curtumes, papel, têxteis, etc, possuem compostos corados, na forma suspensa, coloidal ou solução. Essas substâncias absorvem a radiação solar de curto comprimento de onda impedindo a sua penetração na água, reduzindo assim a ação fotossintética de espécies vegetais clorofiladas. A principal fonte de oxigênio no corpo receptor é justamente a ação fotossintética, através da qual, os vegetais clorofilados consomem gás carbônico e liberam oxigênio para o meio.

2.3.2.3 – Odor

Esgotos recém lançados possuem odor desagradável e até mesmo fétido, devido a produção de gás sulfídrico e outros gases provenientes da decomposição.

2.3.2.4 – Turbidez

A turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água, conferindo uma aparência turva a mesma. Uma elevada turbidez reduz a fotossíntese da vegetação aquática que, por sua vez, afetará a população de peixes e demais organismos aquáticos. Alguns autores definem que turbidez é uma condição de um corpo de água, causada pela suspensão de material finamente

dividido. Este parâmetro é influenciado pelo teor de sólidos no esgoto em questão. Pode variar conforme a suspensão de sólidos no meio, estando nos esgotos mais concentrados, a maior turbidez (LERMONTOV, 2003).

2.3.2.5– Sólidos

São orgânicos e inorgânicos; suspensos, dissolvidos e sedimentáveis. Quando retidos em papel 0,45 µm a 2 µm são denominados sólidos em suspensão. Os fixos são formados pela composição inorgânica, inertes e não incineráveis, sendo os voláteis a fração orgânica. Ainda, existem os sólidos dissolvidos que não são retidos pelos filtros. Estes também podem ser divididos em inorgânicos e orgânicos e possuem as mesmas características físicas dos sólidos em suspensão. Finalizando, tem-se os sólidos sedimentáveis. O teste é realizado no chamado cone *Imhoff* e ocorre a sedimentação dos sólidos no período de 1 hora.

Conforme VON SPERLING (2005), todos os contaminantes, exceto gases dissolvidos, contribuem para a constituição de sólidos em um determinado esgoto. Os sólidos, como dito anteriormente, podem ser divididos de acordo com o seu tamanho, suas características químicas e sua decantabilidade. De acordo com a sua natureza, adota-se uma classificação mais simples, denominando o particulado de sólidos em suspensão e solúveis a fração dissolvida. Em laboratório, ocorre a separação utilizando a filtração e em seguida a evaporação do filtrado. Quanto a classificação química, quando submetida a uma temperatura elevada, a fração orgânica é oxidada e volatilizada, permanecendo apenas a fração inorgânica ou inerte. Pode-se estimar a matéria orgânica encontrada nos sólidos e a mineral encontrada após a volatilização. Em relação à sedimentalidade ou decantabilidade, entende-se como sendo todo o sólido que com a ação da gravidade se decanta no chamado cone *Imhoff*, após o período de 1 hora.

2.3.2.6 – Matéria Orgânica

É a principal fonte de poluição de uma fonte de água. O consumo de oxigênio dissolvido inicialmente no corpo hídrico é utilizado pelos microrganismos nos seus

processos metabólicos e assim, estabilizar a matéria orgânica. As substâncias orgânicas presentes no esgoto são principalmente as proteínas (40-60%), os carboidratos (25-50%), lipídios (8-12%) e outros compostos em menor teor como uréia, detergentes (surfactantes), pesticidas e metais. De uma forma geral, o teor orgânico de um esgoto pode ser dividido quanto à forma e tamanho e quanto à biodegradabilidade. O principal efeito deletério causado pela matéria orgânica em um corpo hídrico é o decréscimo do teor de oxigênio dissolvido causado pelo seu uso pelos microrganismos que se alimenta da matéria orgânica. Porém, em algumas etapas do tratamento, existe a necessidade de ceder oxigênio ao tratamento (LERMONTOV, 2003).

A demanda biológica de oxigênio (DBO_5) é medida em 5 dias e em temperaturas de 20°C. Esse parâmetro está associado à fração biodegradável dos componentes orgânicos encontrados no esgoto. É uma medida de oxigênio consumido após 5 dias de teste, onde os microrganismos agem oxidando bioquimicamente a matéria orgânica.

O teste de demanda bioquímica de oxigênio indica a fração biodegradável do despejo, ou seja, a sua taxa de degradação. Ainda indica a taxa de consumo de oxigênio em função do tempo.

A demanda química de oxigênio refere-se à quantidade de oxigênio necessária para oxidar totalmente a fração orgânica do esgoto, ou seja, a biodegradável e a não biodegradável. Utiliza para essa dosagem meio ácido na presença de dicromato de potássio.

Segundo VON SPERLING (2005), quando a relação DQO/DBO é baixa, ou seja, menor que 2,5, a fração biodegradável é elevada. O tratamento indicado para tal despejo seria um tratamento biológico. Quando a relação é intermediária, entre 2,5 e 3,5, a fração biodegradável é baixa e então nesses casos, indica-se um estudo de tratabilidade do despejo para verificar a possibilidade de tratamento biológico. Quando a relação é elevada, sendo maior que 3,5, a fração inerte é elevada, indicando para esse despejo um tratamento físico-químico.

2.3.2.7 – Carbono Orgânico Total (COT)

Outro parâmetro para a dosagem de matéria orgânica é o chamado carbono orgânico total. É uma medida da matéria orgânica carbonácea e é determinado pela conversão do carbono orgânico em gás carbônico.

2.3.2.8 – Nitrogênio

Outro constituinte importante no esgoto é a fração nitrogenada, pois o nitrogênio é indispensável para o desenvolvimento dos microrganismos, principalmente nos tratamentos biológicos. O aporte de nitrogênio nos corpos d'água ocorre por difusão, na forma gasosa, ou na forma orgânica lixiviada das rochas e solo, principalmente se nestes solos são utilizados fertilizantes ricos em compostos nitrogenados. Outra considerável contribuição de nitrogênio é o despejo de esgoto doméstico, sem tratamento prévio, e que são lançados "*in natura*" nos corpos hídricos (LERMONTOV, 2003).

O nitrogênio se altera em diversas formas dentro de seu ciclo na biosfera. Essa mudança decorre de diversos processos bioquímicos dos quais participa. Nas etapas de oxidação e estabilização da matéria orgânica, o nitrogênio utiliza oxigênio do meio, implicando assim no consumo de oxigênio dissolvido do meio para a conversão da amônia a nitrito e deste para nitrato, em um processo chamado de nitrificação. Para a comunidade aquática, o nitrogênio na forma amoniacal é toxico. O estudo das formas nitrogenadas pode indicar o estágio da poluição em um determinado trecho de um curso d'água. Em poluições recentes, pode ser encontrado na forma orgânica ou amônia e, se antiga, basicamente na forma de nitrato.

São conhecidas as diversas implicações ecológicas resultantes dos altos teores de nitrogênio em um dado corpo hídrico. Essas concentrações estão ligadas ao teor de oxigênio. Assim, altos teores de nitrogênio, principalmente amoniacal, ocasionam a eutrofização e o respectivo consumo de oxigênio do meio, afetando a vida aquática (LERMONTOV, 2003).

2.3.2.9 – Fósforo

Ainda na composição do esgoto, destaca-se a presença da fração fosforada. Segundo IAWQ (1995), o fósforo pode ser encontrado na forma orgânica e inorgânica. Na forma inorgânica, o fósforo é chamado de orto-fosfato e sua origem principal são os detergentes. A sua forma orgânica provém de compostos de origem fisiológica. Os fosfatos solúveis ou ortofosfatos estão disponibilizados diretamente para o metabolismo celular, não havendo necessidade de conversões para formas mais simples. As formas encontradas também dependerão do pH do meio, assim como ocorre com o nitrogênio amoniacal. Os polifosfatos são moléculas mais complexas e através da hidrólise se transformam em ortofosfatos, porém trata-se de um processo lento.

Trata-se de um componente importante para os microrganismos existentes no esgoto e, portanto, muito importante para os tratamentos biológicos. Em relação à poluição hídrica, é um componente presente no crescimento de algas, apresentando nesse sentido a chamada eutrofização de corpos hídricos.

2.4 – Tratamento de esgoto

2.4.1 – Tratamento de esgoto no Brasil

A deficiência de tratamento dos efluentes líquidos domésticos é um cenário problemático que atinge todas as regiões do Brasil. Em estados como São Paulo, responsável por aproximadamente 32% do PIB nacional, o esgoto é coletado nas áreas urbanas e em muitos casos não recebe qualquer tratamento antes do seu descarte.

A Tabela 2.1 apresenta os valores médios dos índices de atendimento para o conjunto de prestadores de serviço participantes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2009) e estão distribuídos por regiões geográficas.

Tabela 2.1 - Níveis de atendimento de água e esgoto por região do Brasil em 2009.

Região	Índices de atendimento (%)				Índice de tratamento dos esgotos gerados (%)
	Água		Coleta de esgoto		Total
	Total	Urbano	Total	Urbano	
Norte	58,5	73,5	6,2	7,7	15,7
Nordeste	69,7	91,4	19,7	26,5	33,0
Sudeste	90,6	97,7	68,2	73,7	41,3
Sul	85,9	97,0	34,4	40,5	32,9
Centro-Oeste	89,0	96,7	46,5	51,4	44,2
Brasil	81,7	95,2	44,5	52,0	37,9

Fonte: Ministério das Cidades – SNIS (2009)

Considerando somente a população urbana, os dados evidenciam um elevado atendimento pelos serviços de água, com índice médio nacional igual a 95,2%, enquanto que na coleta de esgotos esse índice foi de apenas 52,0% (SNIS, 2009).

No ano de 2009, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), em estados como São Paulo, a coleta é maior que 70%. Em contrapartida, tem-se estados com índices menores que 10%, caso de estados como Rondônia, Pará, Amapá e Piauí.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento (PNSB[3]), realizada em 2008, pouco mais da metade dos municípios brasileiros (55,2%) tinham serviço de esgotamento sanitário por rede coletora, que é o sistema apropriado. Entretanto, este valor é superior à pesquisa anterior, realizada em 2000, que registrava 52,2%. Em 2008, a proporção de municípios com rede de coleta de esgoto foi bem inferior à de municípios com rede geral de distribuição de água (99,4%), manejo de resíduos sólidos (100,0%) e manejos de águas pluviais (94,5%). Em 2008, apenas a região Sudeste registrava uma elevada presença de municípios com rede coletora de

[3] A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, conhecida pela sigla PNSB, é uma pesquisa de periodicidade variável, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), instituição pública federal responsável pelas estatísticas oficiais do governo brasileiro. A pesquisa agrega e consolida os dados obtidos através de um levantamento estatístico detalhado do saneamento básico, realizado em todos os municípios do Brasil pela rede de coleta do IBGE.

esgoto (95,1%). Em todas as demais, menos da metade dos municípios a possuíam, sendo a maior proporção observada na Região Nordeste (45,7%), seguida das regiões sul (39,7%), Centro-Oeste (28,3%) e Norte (13,4%). Das 26 unidades da Federação (excluindo o Distrito Federal), mais da metade dos municípios possuíam rede coletora de esgoto, sendo os extremos representados pelos estados de São Paulo (99,8%) e Piauí (4,5%) (PNSB, 2008).

Apenas 28,5% dos municípios brasileiros, segundo a mesma pesquisa, faziam o tratamento do seu esgoto. Isto impacta negativamente na qualidade dos recursos hídricos disponíveis. Mesmo na Região Sudeste, onde existem 95,1% de rede coletora, apenas 48,4% realizam o tratamento, antes do descarte final. Além da Região Sudeste, o melhor desempenho nesse sentido foi observado nas Regiões Centro-Oeste (25,3%) e Sul (24,1%).

O Atlas do Saneamento[4] (2011) compara o número de municípios com rede coletora de esgoto e mostra que, apesar dos avanços constatados entre os anos de 2000 e 2008, ainda trata-se de um grande desafio para o país, pois o esgotamento sanitário era o serviço que representava menor abrangência municipal, atingindo um percentual de 55,2%, para todo o país em 2008. Apesar da menor abrangência, em especial aos municípios com população menor que 50 mil habitantes, houve aumento na proporção de domicílios com acesso à rede de esgoto, que passou de 33,5%, em 2000, para 45,7%, em 2008. A Tabela 2.2 compila dados referentes aos principais serviços (rede de água, rede coletora de esgoto e manejo de sólidos) relatados por região publicados pelo relatório.

Tabela 2.2 - Níveis de atendimento de água e esgoto por região do Brasil em 2000 e 2008.

Brasil e Regiões	Total de municípios		Tipo de serviços					
			Água		Esgoto		Sólidos	
	2000	2008	2000	2008	2000	2008	2000	2008
Brasil	5507	5564	5391	5531	2877	3069	5475	5562
Norte	449	449	422	442	32	60	445	449
Nordeste	1787	1793	1722	1772	767	819	1769	1792
Sudeste	1666	1668	1666	1668	1547	1586	1666	1667
Sul	1159	1188	1142	1185	451	472	1149	1188
Centro-oeste	446	466	439	464	80	132	446	466

Fonte: Atlas do Saneamento – IBGE (2011).

[4] Publicação IBGE, 2011- http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/publicacao.html

Segundo COSTA (2006), o objetivo principal do tratamento de esgoto é corrigir as características indesejáveis de tal maneira que seu uso ou disposição final possa ocorrer de acordo com as regras e critérios definidos pelas autoridades regulamentadoras.

Para o tratamento de um determinado despejo, adota-se um conjunto de critérios que são elencados para qualquer tipo de resíduos industrial ou sanitário:

- Impacto ambiental do lançamento no corpo receptor;
- Nível do tratamento necessário;
- Eficiência de remoção que é desejada.

Os despejos industriais requerem estudos mais completos, mesmo porque possuem uma alta complexidade e diversidade de compostos encontrados em suas matrizes. Sendo assim, os estudos estão direcionados para a sua biodegradabilidade, onde estima-se a capacidade do despejo ser estabilizado por processos bioquímicos, através do emprego de micro-organismos. Ensaios de tratabilidade estão focados na possibilidade deste despejo ser tratado por processos biológicos convencionais.

2.4.2 – Tipos de tratamento

Segundo VON SPERLING (2005), os níveis de tratamento podem ser divididos em função da sua remoção:

- Preliminar: Retirada de sólidos grosseiros, predominando o tratamento físico;
- Primário: Remoção de Sólidos sedimentáveis e da DBO em suspensão (DBO associada aos sólidos em suspensão), predominando o tratamento físico;
- Secundário: Basicamente toda fração biodegradável, predominando o tratamento biológico;
- Terciário: Remoção de nutrientes, organismos patogênicos, compostos não biodegradáveis, metais pesados e fração remanescente.

O sistema de tratamento é composto por diversas operações e processos unitários e a integração desses processos visa o atendimento aos requisitos a serem obedecidos em função da legislação especifica que prevê padrões de qualidade para o efluente e para o corpo receptor. Segundo VON SPERLING (2005), as operações em uma unidade de tratamento podem ser divididas da seguinte forma:

- Operações físicas unitárias: Aplicação de forças físicas. Nesse grupo estão incluídos o gradeamento, a mistura, sedimentação, floculação, flotação e filtração;

- Processos químicos unitários: a interação com o fluido a ser tratado ocorre através de produtos químicos ou devido a reações químicas. Nesse grupo, estão incluídas a precipitação, a adsorção e desinfecção;

- Processos biológicos unitários: nesses processos, a remoção ocorre em função da atividade biológica promovida pelos micro-organismos. Aqui, estão incluídos os processos de desnitrificação, nitrificação e remoção da matéria orgânica.

Os mecanismos biológicos ocorrem no chamado tratamento secundário. Essa fase objetiva a remoção da matéria orgânica e em alguns casos ainda prevê a retirada de nutrientes. Já a fase final, ou seja, o tratamento terciário tem como finalidade a remoção de poluentes específicos e complementa o estágio anterior.

2.4.2.1 – Tratamento preliminar

Nesse primeiro estágio ocorre a retirada de sólidos grosseiros e os mecanismos para essa remoção são físicos, sendo utilizadas grades, peneiras (rotativas ou estáticas) ou trituradores. Realiza-se, nessa fase da estação, a medição da vazão de chegada do fluxo a ser tratado, por exemplo, utilizando a chamada calha *Parshall*. A intenção dessa remoção visa a proteção de bombas e tubulações existentes ao longo do caminho do esgoto bruto.

Na grade, todo o material de maiores proporções é retido. Existem vários tipos de grades e espaçamentos entre elas.

Nesse estágio estão localizados os desarenadores que são responsáveis pela retirada de areia realizando sedimentação. Devido às suas dimensões e densidade serem maiores, a areia é sedimentada e segue para o fundo do tanque.

Em casos específicos de tratamento, principalmente indicado para plantas industriais, há inclusão de tanques de equalização que tem como finalidade regular a vazão de entrada, intencionando mantê-la constante e próxima da vazão média diária. Isso facilita as operações posteriores, além de facilitar o tratamento. Essa implantação é justificável devido às grandes variações de vazão que podem ocorrer em uma estação na sua rotina.

2.4.2.2 – Tratamento primário

No tratamento primário, é iniciado o processo de retirada do resíduo sedimentável e assim, ocorre consideravelmente uma queda da concentração da matéria orgânica. Parte significativa da matéria orgânica pode ser encontrada nos sólidos em suspensão e processos simples, como sedimentação, iniciam a retirada da matéria orgânica, facilitando a fase posterior. Nesse estágio, a eficiência de remoção de sólidos situa-se em torno de 60-70% e a DBO em torno de 25-30%. O lodo começa a ser formado em função da retirada do sólido em suspensão. Nos tanques de decantação, o esgoto passa em um regime lento e assim, o sólido, com maior densidade, por gravidade, é depositado no fundo dos tanques. Esse tipo de lodo é o chamado de lodo primário bruto. Para obter uma redução nos custos de energia elétrica e diminuição dos volumes das unidades de tratamento, os tanques dos decantadores primários estão sendo substituídos pelos reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blancket*) ou reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo. Geralmente, os tanques de decantação do tratamento primário antecedem o tratamento por lodos ativados e reatores aeróbicos (VON SPERLING, 2005).

O uso do reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo, apesar de ampla utilização no Brasil, ainda apresenta algumas limitações. Entre elas, estão os resíduos do processo formados, ou seja, o lodo excedente e o biogás formado, pois ainda faltam políticas que governem tais descartes. No caso do lodo excedente, o descarte deverá ser realizado periodicamente, caso contrário o seu acúmulo no interior do reator promoverá uma perda de sólidos em excesso para a decantação,

prejudicando assim a qualidade do efluente final, fazendo com que o tratamento perca a sua eficiência. Esse lodo, ainda precisa de tratamento como desidratação e higienização, em caso de uso agrícola, devido a presença de patógenos. Em relação ao biogás formado, em muitas unidades no país, esse gás é então queimado no *flaire*, impossibilitando o seu lançamento no meio ambiente, visto que é impactante por apresentar um GWP (*Global Warming Potential*) 21 vezes superior, quando comparado ao dióxido de carbono (BÖRJESSON, 2006). Todavia, o metano, principal constituinte desse biogás, possui elevado poder calorífico (35,9 MJ/m^3) que faz com que desperte interesse para o seu aproveitamento energético (LOBATO, 2008).

2.4.2.3 – Tratamento secundário

O foco desta etapa é a retirada da matéria orgânica. Os processos simulam a degradação natural dos compostos, porém em intervalos de tempo menores e com condições de processo controladas. Toda matéria orgânica é utilizada como substrato para os micro-organismos existentes no esgoto bruto, ocorrendo a conversão da matéria orgânica em gás carbônico e água. Em condições anaeróbicas ocorre a formação de metano. Existem vários tratamentos, porém serão destacados aqui os reatores anaeróbicos.

Nos digestores anaeróbicos, os micro-organismos utilizam o lodo como fonte de alimentação. Assim, ocorre uma diminuição entre 35-45% em seus sólidos voláteis. A produção de lodo nesse estágio de tratamento é bem menor, quando comparada a fase aeróbica: 97% de anabolismo contra apenas 30% (COSTA, 2006).

Enzimas produzidas por diferentes tipos de bactérias permitem dividir as reações da etapa anaeróbica em três grupos: hidrólise, acetogênese e metanogênese (LASTELLA, 2002).

A Figura 2.1 apresenta a sequencia metabólica envolvida no processo de digestão anaeróbica.

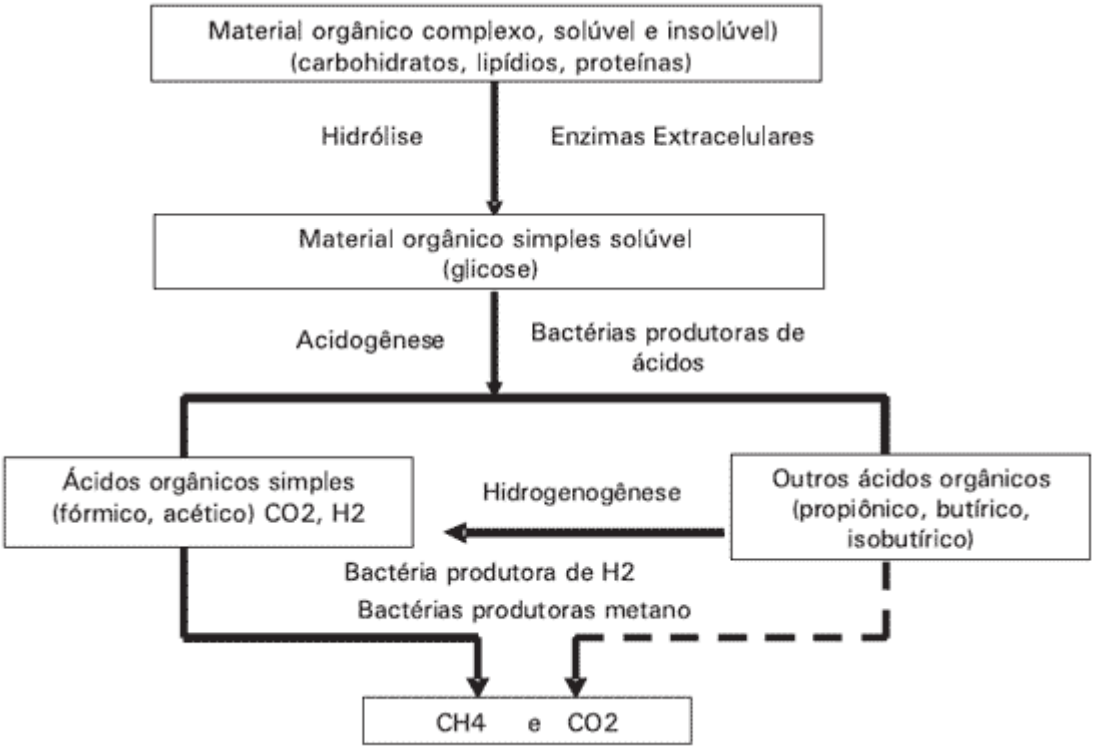

Figura 2.1 - Sequencia metabólica e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbica. Fonte: CHERNICHARO, 1997

A maioria das bactérias acidogênicas é anaeróbica estrita, mas cerca de 1% consiste de bactérias facultativas que podem oxidar o substrato via rota oxidativa. Isto é importante, pois estas bactérias anaeróbicas estritas devem ser protegidas do oxigênio dissolvido, eventualmente presente no meio. Todas as reações envolvidas no processo ocorrem em sequencia e simultaneamente, ou seja, o produto de determinadas reações é o substrato para a rota seguinte. Todas as reações ocorrem em situação de equilíbrio (SANTOS, 2004). Vários autores estudaram ainda a presença de elementos-traço e micronutrientes na etapa anaeróbica (SCHATTAUER *et al.*, 2011).

Em relação aos custos, pode-se dizer que o tratamento anaeróbico apresenta custos menores em relação aos demais tratamentos. Os custos de aeração e manejo de lodo, que apresentam os maiores custos dentro de uma planta de tratamento, podem ser reduzidos em função de dois fatores: não é utilizado oxigênio no processo de tratamento e a produção de lodo é de 3-20 vezes menor que no tratamento aeróbico. Ainda nesse cenário de vantagens, ocorrerá a produção de biogás (energia renovável), cuja energia gerada ainda pode ser recuperada (SEGHEZZO, 1998).

Esgotos domésticos apresentam Demanda Química de Oxigênio (DQO) baixa, resultando em uma baixa geração de metano. Essa baixa geração de metano não consegue gerar calor suficiente no interior do tanque e assim, não ocorrerá a ativação de certos grupos de bactérias que compõem o processo. Em países de clima tropical, os reatores UASB têm sido utilizados com sucesso para o tratamento de esgotos domésticos. A remoção de 70% de DQO tem sido referenciada por vários autores. Em ambientes onde a temperatura ambiente é baixa, a remoção fica em torno de 65% a 20°C e 55-65% quando a temperatura está entre 13°C e 17°C (LEW *et al.*, 2011).

Existem varias configurações para os reatores anaeróbicos. Os mais utilizados são os tanques sépticos e os reatores UASB. Os tanques sépticos são unidades de digestão anaeróbias amplamente utilizadas nas zonas rurais e comunidades carentes. A digestão ocorre no fundo do tanque devido à deposição de todo o material em suspensão por gravidade. Existem unidades cujos sistemas de tratamento possuem uma fossa séptica seguida de um filtro anaeróbico, denominados de fossa-filtro.

O interesse nos sistemas anaeróbicos como sendo a principal fase biológica em uma estação de tratamento foi tímido até o aparecimento do chamado reator UASB, o reator anaeróbico de manta de lodo ou *RAFA* - reator anaeróbico de fluxo ascendente, na década de 70. Sistemas criados anteriormente chamados de tanques de contato anaeróbicos foram estudados e bem antes disso, em 1910, foram criados “tanques biolíticos”. Atualmente, os tanques UASB são indicados e utilizados para vários tipos de descartes (SEGHEZZO, 1998).

A eficiência de um reator UASB está ligada à manta de lodo formada no seu interior e que se deposita no fundo do tanque. Este lodo é formado devido à constante carga de entrada de sólidos e é nele que ocorre o crescimento bacteriano. Essa formação é responsável pelos mecanismos biológicos e na consequente degradação da matéria orgânica. Nos sistemas UASB, sob certas condições, pode ser observada formação de flocos e agregados contendo bactérias na sua superfície (SEGHEZZO, 1998).

Em algumas estações de tratamento, o efluente proveniente do reator ainda precisará de um tratamento posterior para retirar a matéria orgânica remanescente, bem como patógenos e nutrientes ainda presentes no pós UASB.

CAPÍTULO 3

3. Produção e Aproveitamento do Biogás

3.1 - Biogás

Em 1776, foi descoberto pelo italiano Alessandro Volta o gás metano, produto de decomposição de materiais orgânicos em geral. Formador principal do biogás, o metano é encontrado com dióxido de carbono e traços de amônia, hidrogênio, monóxido de carbono e sulfeto de hidrogênio entre outros compostos sulfurados, compostos halogenados e aromáticos. Embora presente em traços, esses compostos, quando liberados, atacam a atmosfera prejudicando o ar local, trazendo impactos deletérios ao meio ambiente (RASI, 2007).

A Tabela 3.1 apresenta a composição do biogás e suas características que variam de acordo com a fonte geradora.

Tabela 3.1 - Características e composição do biogás em função da fonte geradora.

Parâmetro	Gás de aterro[5]	Biogás digestão anaeróbica[6]
Poder calorífico inferior (MJ/Nm^3)	16	23
Metano (%vol)	35-65	53-70
Dióxido de carbono (%vol)	15-50	30-47
Nitrogênio (%vol)	5-40	-
Ácido sulfúrico (%vol)	< 100	< 1000
Amônia (%vol)	5	< 100

Fonte: Adaptado de ZANETTI, 2009.

A Tabela 3.2 apresenta os diversos combustíveis e seus respectivos valores de massa específica e poder calorífico.

[5] Produzido a partir de matéria orgânica de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários
[6] Produzido a partir da matéria orgânica de resíduos agropecuários em reatores anaeróbicos

Tabela 3.2 - Alguns combustíveis e valores de poder calorífico.

Combustível	Massa especifica (Kg/Nm^3)[7]	Poder calorífico inferior (kcal/kg)	Poder calorífico superior (kcal/kg)
Petróleo	867	10200	10900
Carvão vapor	n.d.[8]	4000	4460
Carvão metalúrgico	n.d.	7425	7700
Cana de açúcar	n.d.	917	1030
Óleo diesel	851	10180	10750
Óleo combustível	999	9547	10900
Gasolina	738	10556	11230
GLP	552 (liq)	11026	11750
Nafta	704	10462	11320
Querosene	787	10396	11090
Coque de carvão mineral	n.d.	6900	7300
Lixívia	2100	n.d.	3030
Carvão vegetal	250	6115	6800
Álcool anidro	791	6400	7090
Álcool hidratado	809	5950	6650
Bagaço de cana	n.d.	1777	2257
Gás de refinaria	0,78	8272	8800
Gás natural	n.d.	8554	9400

Fonte: Adaptado de COSTA, 2006

Como qualquer outro gás, o biogás depende de variáveis tais como temperatura, pressão e umidade. Mais especificamente, dependerá do teor de metano e concentração de gases inertes.

O biogás é produzido de diferentes fontes e através da digestão anaeróbica sob determinadas condições (CHEN, 2008). Entre as fontes geradoras podem ser encontradas o esgoto doméstico e resíduos da indústria alimentícia, além de resíduos provenientes da agricultura. Nesse último caso, o uso do material digerido reduz o emprego de fertilizantes químicos nas lavouras. O metano é o seu principal gás e é uma importante fonte de energia renovável, porém torna-se nocivo quando lançado diretamente na atmosfera. O metano produzido pode ser utilizado como

[7] CNTP – Condições normais de temperatura e pressão
[8] Não disponível

fonte de calor e geração de energia elétrica, reduzindo assim o seu lançamento na atmosfera e o uso de combustíveis fósseis. Quando queimado, o biogás emite menores concentrações de óxidos nitrogenados, hidrocarbonetos e monóxido de carbono do que a queima de fósseis. Substituindo as fontes fósseis, o biogás normalmente reduz a emissão não apenas dos gases que promovem o efeito estufa, mas também de óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos e outras partículas.

Com a divulgação de estudos que comprovam que o metano promove uma "captura" dos raios ultravioleta e sua tendência de permanência na atmosfera é longa e persistente devido à sua estabilidade, o aumento de concentração desse gás na atmosfera tem sido pesquisado (EL-FADEL, 2001). Se comparada ao gás carbônico, a sua tendência em "aprisionar" a radiação ultravioleta é de 21 vezes maior. Considera-se o gás carbônico como sendo o segundo maior contribuinte para o efeito estufa.

Na digestão anaeróbica, tanto a formação de ácidos quanto de metano pode variar conforme a fisiologia das bactérias, fontes de nutrição, cinética de crescimento e a sensibilidade às condições ambientais existentes (HAMMADA, 1999). A produção de metano é condicionada a vários fatores, incluindo temperatura, pH, relação C/N, composição da biomassa e presença de compostos tóxicos. A temperatura é um importante parâmetro e faixas são importantes para o correto funcionamento do sistema. Para o nível mesofilico, a temperatura pode variar entre 35 e 40 °C e para o nível termofilico, a faixa pode variar entre 55 e 60 °C.

A digestão anaeróbica pode ser um mecanismo indicado para:

- Tratamento de efluentes industriais,
- Tratamento de efluentes domésticos,
- Estabilização de lodo gerado nas unidades de esgoto,
- Manejo de aterros,
- Reciclagem de resíduos biológicos e agrícolas,
- Degradação de poluentes orgânicos (organoclorados) e materiais não degradados em fases aeróbicas.

Aproximadamente 1000 aterros em todo mundo recuperam o biogás gerado nas unidades, a maioria deles localizados nos Estados Unidos e Europa. Em

pequenas instalações, como nos biodigestores, o biogás gerado é utilizado para cocção e geração de calor. Observa-se também o uso crescente do biogás em sistemas de cogeração ou como suplemento do gás natural. Apesar de todas as possibilidades de uso, a geração de energia elétrica representa 2/3 da quantidade total disponibilizada nas plantas de cogeração (metade obtida nas plantas de cogeração) e o restante para a geração de calor. O uso do biogás como combustível veicular tem sido uma realidade em alguns países, isentando o ambiente de emissões de monóxido de carbono e nitrogênio. Na Suécia já existem mais de 800 ônibus e 4500 carros abastecidos com biogás. O uso do biogás como combustível pode reduzir, em larga escala, as emissões de gases colaboradores do efeito estufa, material particulado e óxidos de nitrogênio (ZANETTI, 2009). Efeitos deletérios desses gases devem ser minimizados e para isso, requerem ações governamentais imediatas (IPCC, 2007).

A quantidade gerada de biogás pode ser influenciada por fatores como:

- Composição dos resíduos: nesse contexto, sabe-se que a quantidade de biogás gerado é diretamente proporcional à quantidade de matéria orgânica;
- Ambiente anaeróbico: o ambiente deve estar inviolável a qualquer presença de oxigênio para evitar uma baixa de eficiência. No caso de aterros sanitários, o resíduo, muitas vezes, é coberto por areia, ou com outras camadas de resíduos, assim permitindo um ambiente propício a formação de um ambiente anaeróbico;
- Umidade: a umidade é um fator importante para a colônia de bactérias nas rotas de decomposição;
- Acidez e temperatura: as bactérias metanogênicas atingem o máximo de sua produtividade na faixa de pH entre 6,8 e 7,2 e temperaturas entre 32 e 35°C. As reações exotérmicas são as principais fornecedoras de calor para o sistema, assim otimizando ainda mais o processo de metanogênese.

3.2 - Métodos de cálculo de produção de biogás

A Equação 3.1 é utilizada para determinar o potencial de produção de biogás de uma unidade que está baseada na quantidade da demanda química de oxigênio

(DQO) removida pelo reator e sua conversão em metano (CH_4), e é chamada de DQO_{CH4}.

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

Sendo:

Q = vazão do esgoto afluente (m^3/dia);

S_0 = DQO afluente (Kg DQO/m^3);

S = DQO efluente (Kg DQO/m^3);

Y_{obs} = coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (0,11 a 0,23 Kg DQO_{lodo}/Kg $DQO_{aplicada}$).

O valor de S, em função da eficiência da remoção do reator (E), varia conforme a Equação 3.2 abaixo:

$$S = (1 - E) * S_0 \qquad (3.2)$$

Parte da demanda química de oxigênio é absorvida na síntese celular no meio e promove o aumento da biomassa, cujo valor é representado pela Equação 3.3:

$$DQO_{abs} = Y_{obs} * Q * S_0 \qquad (3.3)$$

A partir do resultado obtido, é possível calcular o volume de metano produzido por meio da Equação 3.4:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \qquad (3.4)$$

Sendo:

Q_{CH4} = produção volumétrica de metano (m^3/dia);

K (t) = fator de correção para a temperatura operacional do reator (Kg DQO/m^3), onde K(t) é representado pela Equação 3.5:

$$K(t) = \frac{P*K}{R*(273+t)} \qquad (3.5)$$

Sendo:

P = pressão atmosférica (1 atm);

K = DQO correspondente a 1 mol de CH_4 (64 g DQO/mol);

R = constante dos gases (0,08206 atm.L/mol. K);

t = temperatura operacional do reator (°C).

Porém, SANTANA (2010) observou que significativa parte do metano formado no reator poderá ser perdida, sendo esta parte solubilizada na matriz liquida, reduzindo assim o potencial energético do biogás gerado. Dessa forma, o potencial de biogás deverá considerar essa diferença e será equacionado pelas Equações 3.6 e 3.7:

$$Q_{CH_4} = (1 - \%CH_{4dissolvido}) * Q_{CH4} \qquad (3.6)$$

$$Q_{biogás} = Q_{CH4\ liquido} * \%CH_{4\ biogas} \qquad (3.7)$$

O cálculo do potencial elétrico do biogás é dado a partir da quantidade de esgoto tratado por dia na estação, sendo aplicada a Equação 3.8:

$$P = \frac{Q_{biogas} * PCI_{biogas} * \eta_{gerador} * 4{,}1868}{86400} \qquad (3.8)$$

Onde:

PE = Potência Elétrica (KW);

$Q_{biogás}$ = Vazão (produção média) do biogás (m^3/dia);

$PCI_{biogás}$ = Poder calorífico Inferior do biogás (kcal/m^3);

$\eta_{gerador}$ = 30% baseado no valor médio de conversão das tecnologias existentes;

4,1868 = Fator de conversão de kcal para kJ.

3.3 – Tratamento do Biogás

O biogás necessita atender à especificações para ser utilizado como insumo energético, entre eles ter baixo teor de umidade e compostos sulfurosos. Além disso, pode-se otimizar o seu poder calorífico e padronizar o gás produzido. Os principais

parâmetros que podem requerer remoção em um sistema de tratamento são: H_2S, água, CO_2 e compostos halogenados (KYMÄLÄINEN, 2012).

Além de compostos sulfurados e halogenados, o biogás pode conter outras substâncias que, mesmo em quantidades mínimas, possuem impacto significativo na natureza (RASI, 2007).

Substâncias não combustíveis no biogás devem ser retiradas, pois prejudicarão a queima tornando-o menos eficiente, além de absorverem parte da energia do sistema. Entre vários efeitos que prejudicam o sistema estão a queima incompleta (combustão incompleta), falha na alimentação, perda de potência e corrosão, que ocorrerá quando a concentração de gás sulfídrico exceder determinada concentração.

A Tabela 3.3 apresenta os teores permitidos para cada componente de acordo com o tipo de aplicação do biogás.

Tabela 3.3 – Necessidade de remoção de compostos gasosos conforme a utilização.

Aplicação	H_2S	CO_2	H_2O
Caldeiras	< 1000 ppm	Não	Não
Fogões	Sim	Não	Não
Cogeração	< 1000 ppm	Não	Condensação do vapor
Combustível veicular	Sim	Recomendável	Sim
Rede de gás natural	Sim	Sim	Sim

Fonte: IEA, 2005 *apud* ZANETTI, 2009

O gás de aterro, por exemplo, contém quantidades significativas de compostos halogenados que necessitam ser removidos antes do uso. Geralmente, também apresenta quantidades elevadas de oxigênio, pois o gás “sugado” arrasta ar na sua coleta.

Para uso veicular, o teor de CO_2 deve ser removido, apesar do motor poder ser adaptado para a queima. Além da sua remoção favorecer o aumento do poder calorífico do biogás, no caso de utilizar o biogás em uma rede de gás natural, o gás deve alcançar o chamado Índice de Wobbe[9] necessário. É importante salientar que

[9] O índice de Wobbe é uma medida de quantidade de calor fornecida pela queima de gases combustíveis através de um determinado orifício submetido a pressões constantes a montante e jusante desse orifício, usado para comparar a energia produzida pela combustão de diferentes gases num determinado equipamento e corresponde ao quociente entre poder calorífico e a raiz quadrada da densidade relativa sob as mesmas condições de temperatura e pressão de referência (KRONA, 2009 *apud* ZANETTI, 2009).

em qualquer caso de purificação deve-se atentar para a retirada mínima de metano, tanto por razões econômicas quanto ambientais, já que o metano é um gás de efeito estufa 21 vezes mais potente que o dióxido de carbono[10].

A Tabela 3.4 fornece a equivalência energética do biogás e os demais produtos utilizados como insumo:

Tabela 3.4 - Equivalência energética entre o biogás e outras fontes de energia.

Biogás (m³)	Fonte Energética	Equivalências		
		Litros	Kg	kWh
1,00	Gasolina	0,6-0,7	-	-
1,00	Óleo diesel	0,55	-	-
1,00	Querosene	0,58	-	-
1,00	Álcool combustível	0,80	-	-
1,00	GLP	-	0,40	-
1,00	Lenha	-	1,60-3,50	-
1,00	Energia elétrica	-	-	1,25-1,43

Fonte: Filho, 1981 *apud* OLIVEIRA, 2009

A presença de substâncias não combustíveis no biogás prejudicam a sua queima, bem como diminuem o seu rendimento. Um contaminante típico encontrado no biogás é a siloxina, um composto de sílica proveniente de produtos de higiene pessoal e cosméticos (ARNOLD, 2010). Sua presença, mesmo na ordem de partes por bilhão promove, ao longo da linha, problemas diversos na mecânica do sistema. Devido à elevada temperatura, ocorre o aparecimento de areia no interior dos equipamentos (COELHO 2006). Essa substância apresenta baixa solubilidade na água e se aglomera nos sólidos transferidos aos digestores das estações de tratamento.

A Tabela 3.5 mostra as principais impurezas presentes no biogás e seus respectivos tratamentos.

[10] O potencial de aquecimento global do metano (GWP – *Global Warming Potential*) comparado tomando como base o CO_2 para um horizonte de 100 anos, é igual a 25 (IPCC, 2007).

Tabela 3.5 - Técnicas de remoção de impurezas do biogás.

Impureza	Descrição geral	Detalhes
Água	Adsorção	Sílica gel Peneira molecular Alumina Etileno glicol
Hidrocarbonetos	Absorção	(Temperatura -6,7°C) Selexol
	Refrigeração	Resfriamentos a 2°C
	Adsorção	Carvão ativado Óleo leve
	Absorção	Etileno Glicol Selexol (Temperaturas entre -6,7°C e -33,9°C)
	Combinação	Refrigeração com etileno glicol e adsorção em carvão ativado
CO_2 e H_2S[1]	Absorção	Solventes orgânicos Selexol Flúor Rectisol Soluções de sais alcalinos Alcanolaminas Mono, di-tri-etanol amina Deglicolamina
	Adsorção	Peneiras moleculares Carvão ativado
	Separação por membranas	Membrana de fibra oca
Siloxinas[2]	Adsorção	Carvão ativado

Fonte: [1] ALVES, 2000; [2] CAPSTONE *apud* COSTA 2006

Traços de siloxinas são particularmente problemáticos. São compostos semi-voláteis de natureza organo-silicatos encontrados em inúmeros produtos industriais. Em muitos casos, prevalece a forma menos solúvel na água (octametilciclotetrasiloxina e decametilciclopentasiloxina). Nos gases gerados em aterros pode-se encontrar a forma trimetilsilanol que se condensa rapidamente em compostos de siloxinas (ARNOLD, 2010). Sendo esta substância de baixa solubilidade em água, ocorrerá a aglomeração de sólidos nos sistemas de geração.

Quando o biogás contém elevado teor de siloxina ocorrerá, com a sua queima, a reação entre o silício e o oxigênio e assim, será formado o dióxido de silício, também conhecido como sílica. Essas partículas são abrasivas e possuem alto ponto de fusão.

O tratamento do gás para diminuir os efeitos de siloxinas e compostos sulfurosos e halogenados vem ganhando destaque cada vez maior, visto que a presença desses compostos prejudica a eficiência e o uso do gás disponível. O desenvolvimento de técnicas de quantificação de siloxinas tem aumentado consideravelmente em função do mercado de biogás. Análises de traços são empregadas para que um determinado tratamento seja corretamente indicado. A quantidade desses compostos variará conforme o local de disposição ou de planta de tratamento, pois isso dependerá das atividades industriais da área e principalmente do consumo excessivo de cosméticos. Um dos tratamentos mais simples, aplicados na Europa, é a coleta do gás em um "*bag*" ou compartimento de metal. Compartimentos de vidro não são recomendados. Teoricamente, esses resultados são considerados eficientes, embora a problemática esteja voltada para a presença de siloxanas de alto peso (chamadas de D5 e D6) que podem ser absorvidas nas paredes dos reservatórios. Alguns estudos relataram que, além das perdas físicas, reações químicas entre compostos pesados e polares nas paredes dos compartimentos podem ser significativas (ARNOLD, 2010).

A remoção de poluentes do biogás é de crucial importância para garantir um desempenho para explorá-lo como insumo energético. Outro contaminante significativo é o gás sulfídrico que é encontrado em até 2000 partes por milhão no gás gerado. A sua toxicidade é considerável e concentrações iguais a 300 partes por milhão em uma exposição de 30 minutos pode ocasionar perda de consciência de uma pessoa adulta (COSOLI, 2008).

A maioria dos digestores anaeróbios produz um biogás que contém 0,3% a 2% de gás sulfídrico e significantes quantidades de mercaptanas, observando ainda a presença de traços de nitrogênio e hidrogênio (AJAX ENGINES *apud* COSTA 2006).

Existem diferentes técnicas empregadas para a retirada do gás sulfídrico do biogás. Entre elas, podem-se encontrar processos catalíticos e oxidativos. O uso de processos de adsorção explora diversos tipos de adsorventes. Zeólitas são muito

utilizadas em função da sua alta seletividade por compostos polares, como o gás sulfídrico.

A eficiência de um sistema de pré-tratamento do biogás está relacionada diretamente à remoção dos compostos que diminuem o potencial energético do gás. O poder calorífico do biogás depende da concentração de metano de acordo com a Figura 3.1 (JUNIOR, 2008):

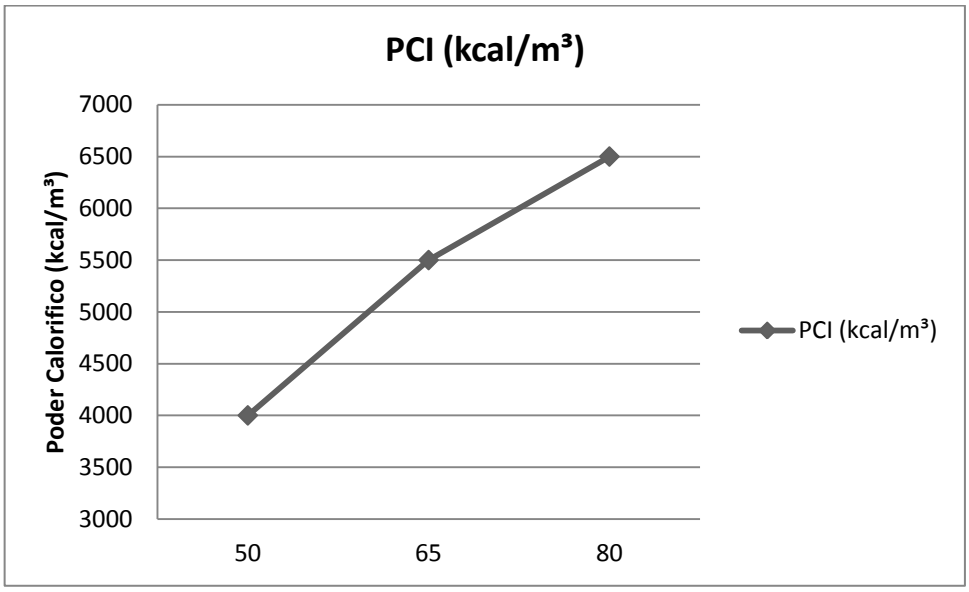

Figura 3.1 - Poder calorífico inferior em função do percentual de metano.
Fonte: JUNIOR, 2008

Para efeito de comparação, na Tabela 3.6 encontra-se o poder calorífico de vários tipos de gases.

Tabela 3.6 - Poder calorífico inferior de vários tipos de gases.

Gases	PCI (kcal/m^3)
Metano	8500
Propano	22000
Butano	28000
Gás natural	7600
Biogás	5500

Fonte: JUNIOR, 2008

A Tabela 3.7 mostra as composições típicas do biogás gerado e após a purificação:

Tabela 3.7 - Composição típica do biogás produzido e purificado.

Composto	% Volume biogás gerado	% Volume biogás purificado
Metano	50-80	80
Dióxido de carbono	20-40	4,07
Sulfeto de hidrogênio	1-2	0,06
Água	1-2	0,98

Fonte: JUNIOR, 2008

Existem diferentes alternativas para o tratamento do biogás e isso dependerá do uso que se pretende. Outro contaminante é o teor de umidade. Não deverão ocorrer resfriamentos durante os processos de limpeza, pois poderão surgir condensações. Além da adoção deste procedimento, outra alternativa é o emprego de dessecantes.

3.4 - Tecnologias de Conversão do Biogás em Energia Elétrica

As tecnologias existentes que realizam a transformação energética do biogás em energia elétrica são as turbinas e os motores de combustão interna. Além dessas mais utilizadas, existe a chamada célula de combustível, porém ainda considerada emergente, encontrando-se em estudo e aperfeiçoamento. Vários fatores devem ser elencados para a escolha de uma determinada tecnologia para a conversão, entre eles, o volume de biogás gerado, o custo, o investimento, a emissão de gases poluentes, entre outros.

Entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso do biogás, a energia química contida nas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica.

A Figura 3.2 apresenta diagrama das diversas alternativas para viabilizar o aproveitamento do biogás.

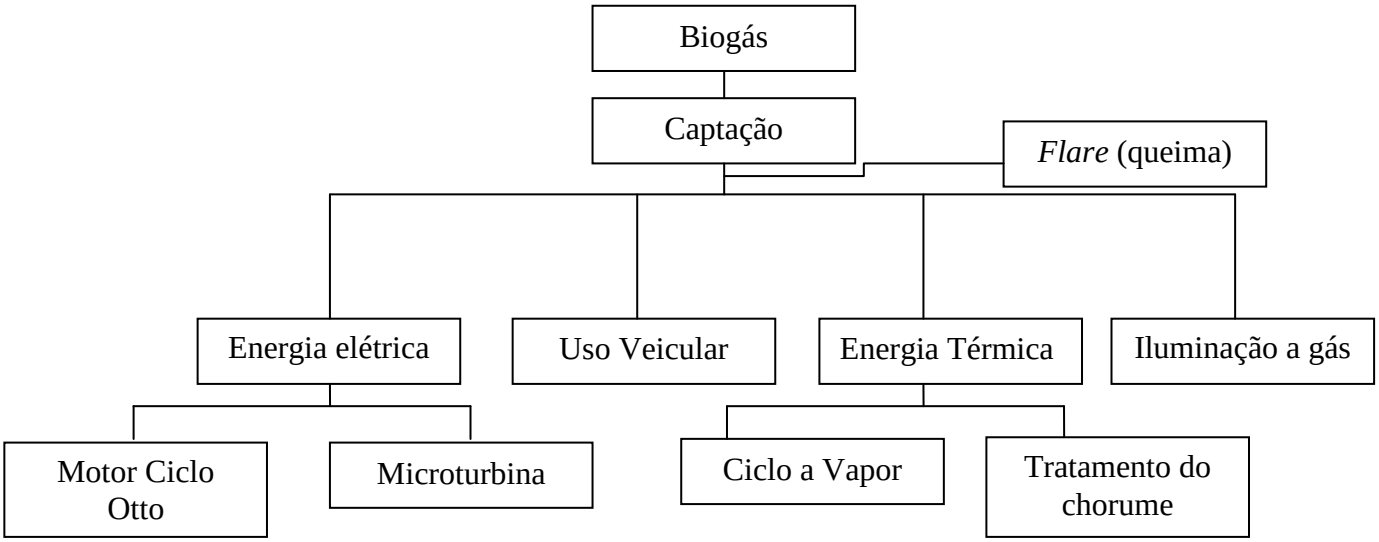

Figura 3.2 - Viabilização para aproveitamento do biogás.
Fonte: ICLEI - Brasil (2009)

Em especial, no caso de aterros sanitários, um dos sistemas utilizados para tratar o chorume é o processo de evaporação. Este processo permite uma redução de até 70% do volume de lixiviado. O tratamento é realizado em equipamento denominado Evaporador, onde o chorume é aquecido a altas temperaturas.

Atualmente, existem diferentes processos empregados para efetuar a conversão energética do biogás. Através de um processo de combustão controlada, o biogás é transformado em energia mecânica. Essa energia, proveniente da energia química, ativa um alternador que a converte em energia elétrica. De todas as tecnologias disponíveis, a combustão interna do tipo Ciclo Otto é a mais utilizada para a conversão energética, além das turbinas a gás e turbinas a vapor. Esse tipo de turbina não faz uso do combustível de uma forma direta, mas convertem a energia térmica formada em energia mecânica. Essa conversão pode ser realizada através de um sistema de cogeração. Já o funcionamento dos motores de combustão de ciclo Otto está baseado no acionamento de pistões confinados em cilindros, sendo esse o funcionamento básico também para os motores a diesel.

Os Grupos Motogeradores possuem uma maior eficiência na conversão elétrica e são mais baratos (OLIVEIRA, 2011).

Por tratar-se de um resíduo proveniente do processo de decomposição, não necessitando de transporte em linhas de distribuição e sendo aplicado no próprio local de produção, o biogás passou a ser uma alternativa economicamente viável

para ser utilizado como insumo para a produção de energia elétrica. A Tabela 3.8 mostra as principais tecnologias e algumas de suas características:

Tabela 3.8 - Características de algumas tecnologias de conversão de biogás.

Característica	Motogerador	Microturbina a gás	Turbina a gás
Rendimento	27-45%	24-28%	18-35%
Combustíveis	Liquido e Gasoso	Gasoso	Gasoso
Emissões (NOx)	27-3000 ppm	< 9 ppm	≤ 50 ppm
Recondicionamento	3-8 meses	24-50 meses	8-24 meses

Fonte: Adaptado PERCORA 2006 *apud* OLIVEIRA, 2011

Muitos autores alertam que para a conversão energética, os motores possuem a maior eficiência, entretanto as turbinas a gás possuirão maior eficiência global quando operadas em cogeração (calor e eletricidade).

Ainda existem os conhecidos motores de queima pobre, também chamados de *"Lean Burn Engine"*, que utilizam o biogás diretamente, dispensando qualquer tratamento prévio aprimorado (SUZUKI, 2011). Porém esses motores são importados o que eleva os custos de operação e manutenção, mas possuem ampla utilização nos Estados Unidos e diversos países da Europa.

As tecnologias de geração e cogeração de energia estão bem desenvolvidas, além de suficientemente comprovadas com diversos sistemas disponíveis, tendo como opções diversos combustíveis e diversas potências.

O biogás é um combustível adequado para a geração de energia elétrica ou cogeração. Diversas tecnologias estão disponíveis, sendo as principais aplicações em geradores com combustão interna e as turbinas a gás. A variação desse potencial pode apresentar o uso de equipamentos de apenas 12 kW até vários MW em grandes aterros. Para a geração de eletricidade, a utilização do biogás em sistemas de combustão interna é uma tecnologia confiável. Milhares desses equipamentos estão espalhados em várias plantas no mundo inteiro. Esses motogeradores precisam receber o biogás pré-tratado e a qualidade deve ser similar ao gás indicado para caldeiras. Para que o sistema tenha uma vida útil maior, as concentrações de gás sulfídrico devem apresentar valores menores que 1000 ppm, pois o ácido sulfuroso formado promove corrosão intensa (ZANETTI, 2009).

Alguns dos principais sistemas utilizados em plantas para o aproveitamento energético são as turbinas, as micro-turbinas e os motores (ciclo Diesel ou Otto).

3.4.1 – Turbinas a gás

É uma aplicação promissora na geração de energia elétrica e trata-se de uma tecnologia estabelecida e que atinge potências superiores a 800 kW. São equipamentos térmicos que realizam a conversão da energia de um dado combustível em potência. Nesses sistemas, ocorre a produção de gases de exaustão em grandes volumes e temperaturas elevadas. Essas turbinas funcionam segundo o ciclo *Brayton*.

Esse tipo de turbina possui três componentes principais: o compressor de ar, uma câmara de combustão e a turbina. Seu principio de funcionamento baseia-se no acionamento do compressor pela turbina e em seguida ocorre a mistura entre o ar comprimido e o combustível na câmara de combustão. Essa mistura é queimada com pressão constante promovendo o aumento da temperatura dos gases. Os gases resultantes da queima são expandidos, transformando sua energia térmica em energia mecânica. Então, as turbinas são acionadas pelos gases quentes da combustão. Sistemas de cogeração baseados nesse tipo de sistema foram estudados por Lautman (JUNIOR, 2008).

A eficiência desse tipo de turbina está baseada na temperatura e pressão dos gases formados. Dessa forma, quanto maior for a temperatura e consequentemente a pressão no primeiro estágio e menor nos gases de exaustão, maior será a eficiência do sistema.

3.4.2 – Microturbinas a gás

Essas turbinas são derivadas da tecnologia utilizada nas chamadas APU's (*Airbone Power Unit*). Esses sistemas são utilizados para fornecimento de energia elétrica para aviões que ainda encontram-se em solo e com as turbinas principais de acionamento desligadas.

Nos últimos anos, turbinas menores também chamadas de microturbinas vêm sendo utilizadas com êxito para o aproveitamento do biogás (ZANETTI, 2009).

Essas turbinas utilizam o mesmo principio de funcionamento das turbinas maiores. O ar atmosférico entra no compressor, onde ocorre a elevação da pressão e, em seguida, segue para a câmara de combustão, onde o combustível mistura-se

com o ar. Após ocorrer a combustão, os gases aquecidos com alta pressão são expandidos, fazendo com que as pás das turbinas girem a alta velocidade. Essa turbina em expansão fornece a energia necessária para girar o compressor e o gerador completo, o que chama-se de ciclo completo. A necessidade da participação de um compressor em um sistema é devido à baixa pressão que o biogás é gerado.

3.4.3 – Motores de combustão interna

São motores que transformam a energia térmica de um combustível liquido ou gasoso em energia mecânica, através do acionamento de pistões, encontrados em cilindros. São divididos em 2 tipos: Otto e diesel. Em 1867, o engenheiro alemão Nikolaus August Otto desenvolveu o chamado ciclo Otto de quatro tempos. Este tipo de acionamento ainda é utilizado atualmente, enquanto que em 1892, outro engenheiro alemão chamado Rudolph Diesel criava o motor a diesel.

Motores com ciclo Otto projetados para funcionar com gasolina são mais susceptíveis ao gás sulfídrico do que o sistema a diesel. Para aplicações de maior escala, indica-se o sistema a diesel (ZANETTI, 2009).

Para a utilização de gases como combustível, os motores de ciclo Otto são os mais indicados. Esse tipo de motor consiste em expansão/resfriamento (adiabática), seguida de resfriamento a um volume constante, aquecimento/compressão (adiabática) e aquecimento a volume constante.

A válvula de entrada de ar abre em um tempo determinado e preciso para permitir a entrada do ar no cilindro, onde ocorrerá a mistura com o combustível. A válvula de escape abre também em tempo preciso para permitir que os gases misturados saiam do cilindro. Com a vela de ignição ocorre a promoção de uma centelha e a explosão é criada. A força da explosão é transferida para o pistão que então, sobe e desce em movimentos constantes. A força do pistão é então transferida para o eixo de transmissão através de uma manivela.

No caso de utilizar o motor a diesel, há necessidade de o gás conter 3-5% de diesel na sua composição. Esses equipamentos são conhecidos como *bi-fuel* ou *dual-fuel*. Em ambos os motores, exige-se o uso de compressores fazendo com que a pressão do gás seja elevada antes de entrar na câmara de combustão.

A Tabela 3.9 mostra a comparação entre as tecnologias disponíveis comercialmente, as potências instaladas e os rendimentos. Outra informação importante é a concentração de compostos nitrogenados (NO_x).

Tabela 3.9 - Comparação entre as tecnologias de conversão de energia.

Tecnologia	Pot. instalada (kW)	Rendimento (%)	Emissões (ppm)
Motor a gás (Otto)	30-20000	30-40	250-3000
Motor diesel	30-20000	30-35	27
Turbinas a gás	500-150000	20-30	35-50
Micro-turbina	30-100	24-28	< 9

Fonte: CENBIO (2004) *apud* JUNIOR, 2008

Os motores a diesel são mais robustos que os motores a gasolina, por exemplo. São empregados em máquinas pesadas, locomotivas e navios.

3.4.4 – Turbinas a vapor

As turbinas a vapor são sistemas que empregam a combustão externa. Isso equivale a dizer que os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho que encontra-se no interior da máquina. Com essa particularidade, esse sistema apresenta a vantagem de poder utilizar combustíveis que podem promover o aparecimento de resíduos no sistema durante a queima.

O sistema de funcionamento desse tipo de turbina baseia-se na presença de vapor de água em alta temperatura e pressão também elevada. Como as turbinas são maquinas de combustão do tipo externa, esses dispositivos devem transferir o calor dos produtos de combustão ao fluido de trabalho. Esse transporte é realizado através de um sistema de diversas serpentinas.

Essas turbinas podem ser divididas em 2 grupos:

- Tipo condensação: A saída de um vapor da turbina com uma temperatura ligeiramente maior que a encontrada no meio externo, assim como uma pressão menor, ao atravessar um condensador retorna ao estado liquido. Esse líquido então é reaproveitado no sistema. Esse tipo de sistema é empregado em usinas termelétricas e nucleares.

- Tipo contra-pressão: Esse tipo de sistema promove a expulsão do vapor da turbina ainda com temperatura e pressão ligeiramente elevadas e é reaproveitado em outras etapas do processo, muitas vezes, em aquecedores, destiladores, estufas, etc. Geralmente é empregado em cogeração de energia em usinas petroquímicas, por exemplo.

Dependendo da tecnologia adotada, pode-se enumerar as vantagens e desvantagens de cada uma. Os motogeradores são de fácil implantação, porém ainda emitem valores elevados de compostos nitrogenados. Já as turbinas possuem baixo custo de operação e manutenção (O&M) e é mais resistente à corrosão provocada pelo biogás.

3.5 - Biodigestores

A digestão anaeróbica e o consequente aproveitamento energético do biogás gerado têm sido utilizados há vários séculos. Os primeiros registros surgiram no século X antes de Cristo, na chamada Assíria e na Pérsia. O aproveitamento do biogás era revertido em calor para o aquecimento de águas para o banho. Já na China e Índia, os resíduos rurais eram utilizados como insumo energético. Atualmente, o uso do processo de digestão anaeróbica está sendo utilizado, com êxito, para o tratamento de resíduos sólidos urbanos, em especial, na Europa.

A digestão anaeróbica, do ponto de vista industrial, iniciou em Bombai, na Índia, a partir de 1859. A partir do conhecimento dos mecanismos de funcionamento e das condições necessárias, foram desenvolvidos tanques selados e equipamentos de aquecimento e de mistura, a fim de otimizar o máximo possível o processo. Os estudos de Buswell e outros permitiram identificar as bactérias anaeróbicas e as condições mínimas necessárias para a produção de metano. Do ponto de vista da aplicação da digestão anaeróbica no tratamento de resíduos, pode-se dividi-la em 4 estágios: pré-tratamento, a digestão de resíduos, a recuperação máxima do biogás e o tratamento dos resíduos. O processamento inicial envolve a separação dos materiais não biodegradáveis, seguido por uma trituração e homogeização. Essa triagem inicial tem como objetivo, a retirada de materiais como vidro, madeira, pedras, etc (REICHERT, 2005).

Entre várias vantagens da digestão anaeróbica, pode-se destacar o aumento da vida útil dos aterros sanitários, a retirada da fração orgânica do lixo coletada (responsável pelos odores) e políticas de sustentabilidade voltadas para a minimização da emissão de gases que aumentam o efeito estufa. Como desvantagem, em função do país (zona de geração) a composição varia consideravelmente. (REICHERT, 2005).

A viabilidade econômica de um processo de aproveitamento do gás gerado com o uso de resíduos sólidos é balizada pelo custo de disposição final nos aterros sanitários e o valor da energia renovável (MATA-ALVAREZ *et al.*, 1992; REICHERT e SILVEIRA, 2005 *apud* REICHERT, 2005). Além disso, deve ser considerado que plantas para esse tipo de aproveitamento são empregadas para média e grande escala, porém pode ser aplicada em pequenas comunidades de forma sustentável.

Os biodigestores são sistemas que tem como finalidade o tratamento de dejetos animais e é amplamente utilizado em todo mundo, existindo atualmente várias plantas operando principalmente nos países em desenvolvimento, onde predominam nas comunidades rurais. Estima-se que na China existam 8 milhões de sistemas em operação. Na Índia, a tecnologia é conhecida há mais de cem anos e existe um programa chamado Projeto Nacional de Desenvolvimento do Biogás, lançado em 1981, que promoveu a instalação de 3,4 milhões de biodigestores em áreas domésticas (KAPDI *et al.*, 2004 *apud* ZANETTI, 2009).

Em 1776, o pesquisador italiano Alessandro Volta descobriu o gás metano e intitulou-o de gás dos pântanos, sendo este gás, segundo ele, produto de decomposição de restos vegetais em ambientes anaeróbicos ou confinados.

> Em 1806, na Inglaterra, Humphrey Davy identificou um gás rico em carbono e dióxido de carbono, resultante da decomposição de dejetos animais em lugares úmidos. [...] Ao que parece apenas em 1857, em Bombaim, Índia, foi construída a primeira instalação operacional destinada a produzir gás combustível, para um hospital de hansenianos. Nessa mesma época, pesquisadores como Fisher e Schrader, na Alemanha e Grayon, na França, entre outros, estabeleceram as bases teóricas e experimentais da biodigestão anaeróbia. Posteriormente, e, 1890, Donald Cameron projetou uma fossa séptica para a cidade de Exeter, Inglaterra, sendo o gás

> produzido utilizado para iluminação pública. Uma importante contribuição para o tratamento anaeróbio de esgotos residenciais foi feita por Karl Imhoff, na Alemanha, que, por volta de 1920, desenvolveu um tanque biodigestor, o tanque *Imhoff*, bastante difundido na época. (NOGUEIRA, 1986, p. 1-2 *apud* GASPAR, 2003)

Segundo GASPAR (2003), o surgimento do biodigestor ocorreu em Bombaim, na Índia.

> Pela literatura existente, o primeiro biodigestor posto em funcionamento regular na Índia foi no início deste século em Bombaim. Em 1950, Patel instalou, ainda na Índia, o primeiro Biodigestor de sistema contínuo. No século passado, Fry, um fazendeiro, desenvolveu pesquisas com biodigestores da África do Sul.

Durante e após a Segunda Guerra Mundial, os italianos e alemães iniciaram estudos para a obtenção de biogás, partindo de dejetos e restos de culturas. Mas já em 1900, o primeiro biodigestor já estava recebendo carga total de biomassa e produzindo biogás e biofertilizante em Bombaim (GASPAR, 2003).

Os avanços na Índia com a criação de diversas unidades incentivou na abertura de diversos centros de pesquisa, entre eles o Instituto Indiano de Pesquisa Agrícola, em Kanpur, em 1939, e depois em 1950, o *Gobar Gás Institute*, comandado por Ram Bux Singh que comandou o instituto durante 18 anos, na região de Ajitmal, no norte da Índia. Sua principal meta era o desenvolvimento de biodigestores com baixo custo e que fosse uma tecnologia que pudesse ser replicada em todo o mundo. Todos os estudos motivaram a China que adotou a tecnologia em 1958, espalhando várias unidades nos arredores do rio Amarelo. Existem dois tipos de biodigestores: o modelo chinês, simples e econômico e o modelo indiano, mais sofisticado, com maior aproveitamento do biogás gerado.

> Há pelo menos meio século, para os chineses, a implantação de biodigestores transformou-se em questão vital, incrustada em lógicas de política internacional. Um país continental, com excesso de população, a

China buscou, durante os anos 50 e 60 do século passado, no auge da Guerra Fria, por uma alternativa de descentralização energética. Baseavam-se em uma lógica simples. No caso de uma guerra que poderia significar a destruição quase total da civilização como a conhecemos, o ataque às centrais energéticas, como poderosas usinas hidroelétricas, representaria o fim de toda atividade econômica. Isso porque a energia deixaria de ser disponível nos grandes centros, mas naqueles pequenos centros, as pequenas unidades de biodigestão conseguiriam passar incólumes ao poder inimigo. A descentralização, portanto, implica em criar unidades suficientes nas pequenas vilas, vilarejos e regiões mais longínquas (GASPAR, 2003).

3.5.1 – Tipos de biodigestores

3.5.1.1 – Indiano

Este tipo de biodigestor é indicado quando se deseja o abastecimento sem interrupção de biogás, fornecendo continuamente biogás para a queima (OLIVEIRA, 2009). Está baseado na fabricação de uma câmara de digestão, localizada abaixo do nível do solo e uma campânula que reserva o gás formado. Este artefato pode ser construído em chapas de ferro ou fibra de vidro, sendo este último material mais resistente, pois não sofre ações corrosivas do meio externo e meio interno, entre eles, o gás sulfídrico que é produzindo na mesma mistura que o metano.

A alimentação para esse biodigestor deve ser diária, sempre com o máximo de 8% de sólidos totais, assim evitando a possibilidade de entupimentos e facilitar a circulação de resíduos na câmara de fermentação.

3.5.1.2 – Chinês

Ao contrário do biodigestor indiano, esse tipo de biodigestor não apresenta partes móveis. É formado por uma única câmara que, por sua vez, é formada por uma única peça. Também é construído abaixo do nível do solo. Trabalha com elevadas pressões por isso sua construção é realizada de alvenaria ou concreto. Com o aumento da produção de gás, a pressão aumenta e força o deslocamento do

resíduo no interior do biodigestor para a saída, e em sentido contrário, quando a produção de gás é baixa. Esse tipo de biodigestor é indicado para instalações de pequeno e médio porte, onde a produção de biogás é alta. Cabe ressaltar que parte desse gás é liberada na atmosfera ou queimada.

Assim como ocorre com o modelo indiano, o biodigestor chinês necessita de constante alimentação, evitando teores de sólidos acima de 8% para não comprometer a sua eficiência (OLIVEIRA, 2009).

3.5.1.3 – Brasileiro

Na década de 70 do século passado, o Instituto de Pesquisa da Marinha do Brasil realizou diversos estudos sobre biodigestores e desenhou 3 modelos: Marinha I, com capacidade de 5,5 m^3 com produção de biogás na faixa de 1,8 a 3,0 m^3 de biogás ao dia; Marinha II, com 22 m^3 de capacidade e produção de 6 a 10 m^3 e o Marinha III, com 65 m^3 de capacidade e com a produção de 15 a 30 m^3 de gás ao dia.

Seu desenho se apresenta como sendo uma base quadrangular, com paredes de alvenaria contendo revestimento interno e uma cúpula. Trata-se, em comparação com os demais modelos, de um biodigestor com maior eficiência devido ao formato mais longo e raso, assim produzindo maior volume de gás por dia (OLIVEIRA, 2009).

O modelo mais utilizado no Brasil é o modelo indiano devido a sua funcionalidade. O modelo chinês exige mais detalhamento na sua construção, requerendo cuidados no assentamento dos tijolos. Cabe ressaltar que o modelo indiano tem como vantagem a construção da sua campânula flutuante, fazendo com que a pressão do sistema seja mantida constante, não sendo necessária qualquer intervenção externa para controle da pressão. A produção de biofertilizante é a mesma nos dois modelos apresentados. (GASPAR, 2003).

3.5.1.4 – Canadense

O biodigestor conhecido como canadense possui um fluxo tubular, contendo a câmara de biodigestão escavada no solo. Possui um gasômetro inflável fabricado de

material plástico ou similar. Durante a produção de biogás, a cúpula infla. Em relação aos demais, possui menor durabilidade, pois a lona plástica pode ser perfurada e ocorrer perda de gás (NEVES, 2010).

3.6 - Aterros Sanitários

No Brasil, constitucionalmente, é de competência do poder publico local o gerenciamento de resíduos sólidos produzidos nas cidades. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2008), 61,2% das prestadoras de serviços de manejo de resíduos sólidos eram entidades vinculadas à administração pública. Somente no estado de São Paulo são gerados diariamente cerca de 29.000 toneladas de lixo, dos quais 44,5% são provenientes da cidade de São Paulo.

Os serviços de coleta de resíduos domésticos e comerciais atingem 75% da população, porém o lixo ainda é disposto de forma precária a céu aberto, em terrenos inapropriados, ou até mesmo, em áreas alagadas e por isso, em alguns casos, promovendo a contaminação da água subterrânea. Paradoxalmente, isso ocorre em 85% dos municípios brasileiros (IBGE, 2010).

No Brasil, basicamente estão localizadas unidades de processamento que adotam a disposição no solo como forma definitiva na destinação final de resíduos domiciliares (RDO) e públicos (RPU), podendo contar ou não com as diversas características físicas (existência de impermeabilização de base, de drenagem de chorume e drenagem de gás, etc) e operacionais (frequência de recobrimento, monitoramento ambiental, etc) que se constituem nos critérios para a sua classificação em lixão, aterro controlado ou aterro sanitário (SNIS, 2009).

As unidades de processamento de resíduos domiciliares e resíduos públicos por disposição no solo (lixões, aterros controlados e aterros sanitários) são o tipo predominante (56,8%). Os vazadouros a céu aberto (chamados de lixões) constituem o destino final de resíduos sólidos em 50,8% dos municípios brasileiros (PNSB, 2008).

Embora este quadro esteja sofrendo mudanças, tal situação configura como um cenário de destinação reconhecidamente inadequada e exige soluções estruturais emergenciais para o setor. A Tabela 3.10 mostra os resultados do destino final dos resíduos no período entre 1989 até 2008.

Tabela 3.10 - Destino final dos resíduos – Brasil 1998/2008.

Ano	Destino final dos resíduos sólidos por unidades de destino dos resíduos (%)		
	Vazadouro a céu aberto	Aterro controlado	Aterro Sanitário
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

Fonte: PNSB, 2008

Em relação à massa coletada (resíduos sólidos domiciliares e públicos), quando agrupados por regiões, os indicadores apresentam valores médios que variam entre 0,81 Kg/hab./dia na região sul até 1,47 Kg/hab./dia na região centro oeste, como visto na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Geração *per capita* de lixo por região no Brasil.

Região	Quantidade de municípios	Massa Coletada *per capita*		
		Mínimo (Kg/hab./dia)	Máximo (Kg/hab./dia)	Indicador [11](Kg/hab./dia)
Norte	48	0,12	2,74	1,15
Nordeste	202	0,11	2,81	1,03
Sudeste	392	0,10	2,58	0,88
Sul	366	0,10	2,96	0,81
Centro-Oeste	79	0,10	2,55	1,47
Total	1.087	0,10	2,96	0,96

Fonte: PNSB, 2008

Observa-se que os menores valores são encontrados em regiões mais desenvolvidas economicamente do país, a sudeste e sul, onde os mesmos atingem 0,88 e 0,81 Kg/hab/dia, respectivamente.

Segundo o Atlas do Saneamento, o número de municípios contemplados pelo manejo de sólidos aumentou de 5475 para 5562, entre os anos de 2000 e 2008 (IBGE, 2011).

A prática de utilização das áreas para aterrar o lixo ainda é a mais comum no Brasil. Existem outras alternativas, como a incineração, compostagem ou

[11] Indicador médio (SNIS)

reciclagem. Os aterros sanitários são os locais adequados para recepção do lixo já que os mesmos reunirão procedimentos corretos para impermeabilização do solo, cobertura de resíduos, captação do chorume, além da correta coleta do biogás e sua consequente queima. A produção de biogás dependerá da correta impermeabilização da cobertura do aterro, possibilitando assim condições adequadas para a decomposição da matéria orgânica, e consequentemente aumentando a eficiência de todo o processo. Além disso, trata-se, do ponto de vista ambiental, de uma forma de minimizar contaminações, tanto no solo como também em lençóis freáticos (ENSINAS; BIZZO, 2003 *apud* PECORA 2010).

O biogás coletado pode ser queimado em *flares*, onde ocorre a transformação do metano em dióxido de carbono, ou então pode ser convertido em energia elétrica e/ou térmica. A Figura 3.3 apresenta um sistema de captação e posterior geração de energia elétrica em um aterro sanitário.

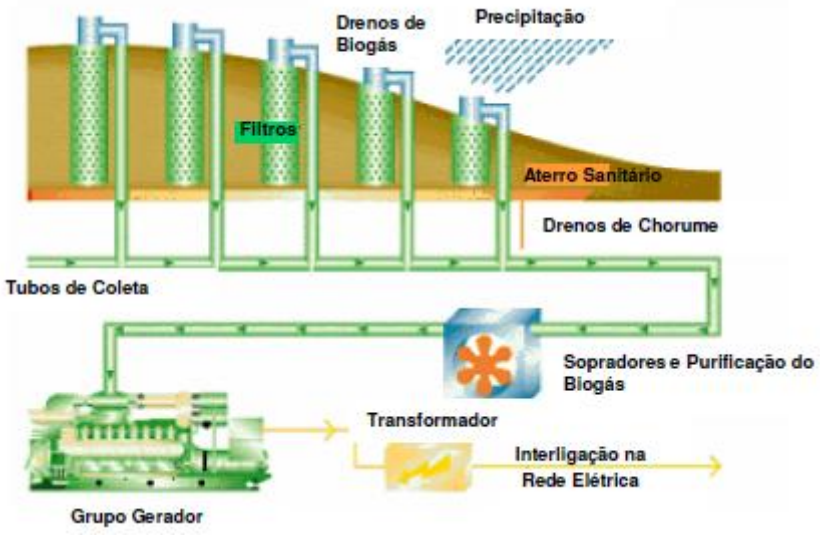

Figura 3.3 - Sistema de captação e geração de energia elétrica em aterro sanitário.
Fonte: WILLUMSEN, 2001 *apud* PECORA, 2010

A disposição de resíduos sólidos em lixões inviabiliza o aproveitamento do biogás, pois além da produção irregular, não existem condições de implantação de drenagem e transporte desse biogás gerado no aterro até as unidades de aproveitamento.

Aterros sanitários podem ser considerados como sendo grandes reatores biológicos, onde as principais matérias primas são os resíduos sólidos combinado com a água pluvial, produzindo gases e lixiviados promovidos pela degradação dos

resíduos. O gás metano pode ser extraído e drenado dessas grandes áreas. Durante o planejamento, realiza-se um cálculo que responderá qual será a produção teórica de biogás formado. Esse cálculo é realizado com base nos anos de operação do aterro. É possível então, os responsáveis realizarem prospecções financeiras em função desse potencial de produção. Tais estimativas são obtidas através de modelos e são propostos por organizações, sendo uma delas a Agência Americana de Proteção Ambiental.

Porém, esses cálculos possuem grau de incerteza e têm sido bastante questionados, mesmo porque a implementação de aterros sanitários tem aumentado e se confirmando como sendo a solução para o destino final dos resíduos urbanos, ao menos no Brasil (FILHO, 2008).

O modelo da Agência Americana de Proteção Ambiental compreende duas metodologias, uma para estimar as emissões controladas, aplicada em aterros que possuem algum tipo de manejo de biogás, seja para geração de energia ou apenas a sua queima, e outra para calcular as emissões não controladas, tendo foco na capacidade de geração anual de metano do aterro. A Equação 3.9 a seguir é utilizada para estimar as emissões não controladas, segundo a USEPA:

$$Q_{CH4} = L_0 * R * (e^{-kc} - e^{-kt}) \qquad (3.9)$$

Onde:

Q_{CH4} = quantidade de gás metano gerado no ano (m^3/ano);

L_0 = potencial de geração de metano por tonelada de lixo (m^3 CH_4/t de resíduo);

R = quantidade anual de resíduos depositados no aterro (t/ano);

k = constante de geração de metano (1/ano);

c = anos desde o encerramento de aterro, sendo c=0 para aterros ativos;

t = anos desde o inicio do depósito de resíduos no aterro.

O valor de L_0 sofrerá variações entre 6,2 a 270 m^3 de metano por tonelada de resíduo. Essa variação dependerá de diversas variáveis presentes, entre elas, o teor de compostos orgânicos. Já o valor de k dependerá da umidade, valor de pH, temperatura e outros fatores locais, bem como as condições que o aterro é operado (USEPA, 1991).

O metano originário dos aterros é emitido estando combinado com outros gases chamados de gases de aterros através de um processo natural de decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos em condições anaeróbicas. Todos os gases, incluindo o metano, são gerados em um período de décadas.

A Figura 3.4 mostra a taxa estimada de emissão de metano de algumas regiões entre 2000 e 2020.

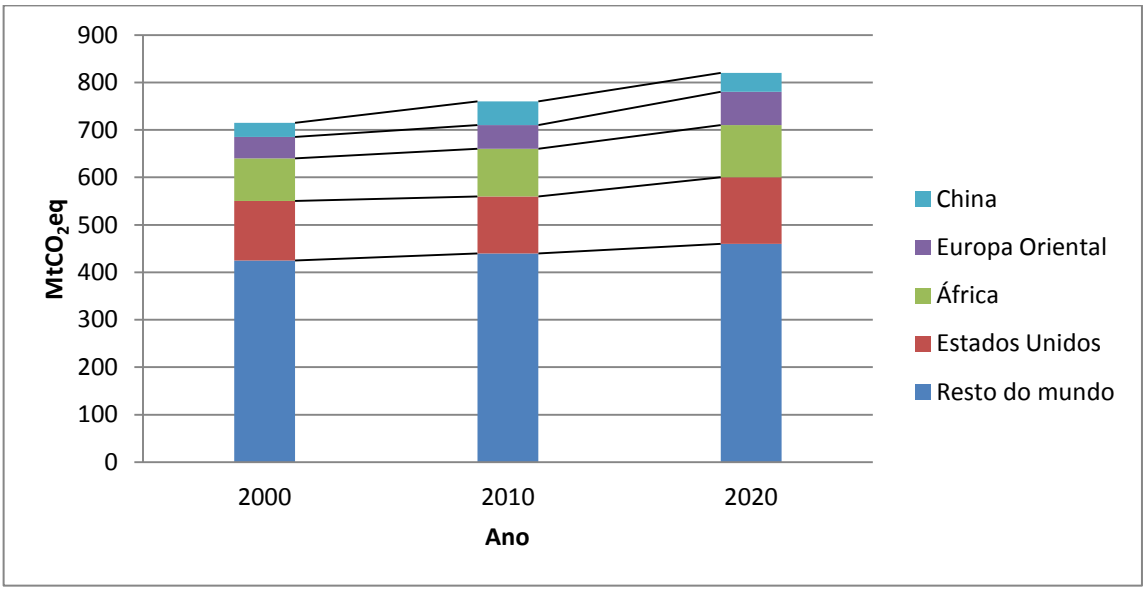

Figura 3.4 - Emissões de metano entre 2000 e 2020 em $MtCO_2eq$ - estimativa
Fonte: USEPA, 2006

A produção de metano depende de diversas características do aterro, incluindo o tipo de resíduo orgânico, a arquitetura do aterro, as práticas operacionais e principalmente, as condições climáticas. Fatores podem acelerar a formação de metano, entre eles, o aumento da superfície de contato entre os diversos resíduos orgânicos da mistura.

A quantidade de metano gerado é influenciada por 3 fatores principais:

- População da cidade;
- Quantidade de resíduo disposto *per capita*;
- Composição do resíduo dispos

A quantidade de resíduo gerado *per capita* multiplicado pela população determina a quantidade de resíduo a ser disposto em uma determinada área. Usualmente, esta quantidade de lixo gerada é diretamente proporcional ao

crescimento das cidades. A composição dos aterros varia conforme o país. As políticas de reciclagem afetam diretamente a quantidade depositada, que diminui se essa política é eficiente ao estimular o reuso de plásticos, metais e outros resíduos renováveis.

Outro fator determinante na formação de metano é o tipo de local de disposição. Geralmente os aterros são classificados em 3 tipos: abertos, controlados e sanitários. Apenas os aterros sanitários são empregados para a implementação de políticas para o aproveitamento energético do metano. Países desenvolvidos empregam os aterros sanitários para o desenvolvimento de diversas políticas para recuperação do metano, enquanto que nos países em desenvolvimento ainda recorrem a um misto dos diversos tipos elencados, porém sendo o sanitário o mais utilizado nas grandes cidades. Apesar de o crescimento populacional estar mais acentuado nos países em desenvolvimento, muitas cidades utilizam os chamados aterros "*open dump*" que não apresentam satisfatoriamente condições anaeróbicas para produzir grandes quantidades de metano.

Em 2000 foram lançados mais de 730 milhões de toneladas (equivalente a dióxido de carbono - $MtCO_2eq$) de metano na atmosfera provenientes de aterros sanitários espalhados pelo mundo, representando mais de 12% das emissões de metano. Estados Unidos, Europa Oriental e China respondem por 42% das emissões mundiais lançadas pelos aterros. Estudos indicaram um crescimento de 9% dessas emissões entre 2005 e 2020 (USEPA, 2006).

A maioria dos países desenvolvidos possui regulamentos a fim de coibirem esses lançamentos, fazendo com que este crescimento seja desacelerado. Entretanto, países da Europa Oriental e China ainda praticam certas políticas que corroboram com o aumento das emissões.

Os governos têm sido pressionados para encontrar novas alternativas para a disposição do lixo devido à problemas ambientais que ocorrem principalmente nos aterros antigos, não possuindo muitas vezes, áreas que atendam o volume crescente (ZANETTI, 2009).

O aterro de sólidos é um processo de disposição permanente através do qual os resíduos são espalhados, compactados e cobertos com o solo. Atualmente, esses aterros são fabricados de modo a isolar a água que possa gerar chorume, promovendo a poluição dos solos. O principal objetivo é isolar o resíduo do ambiente

em um invólucro de solo compactado e plástico. Essa cobertura plástica é uma camada fina de polietileno de alta densidade, que combinada com o solo, forma uma película de proteção.

A partir da decomposição bacteriana anaeróbica dos resíduos ocorre o aparecimento do metano que corresponde a 45-50% do gás gerado nos aterros, enquanto que os demais, como o dióxido de carbono, aparecem na faixa entre 50-55% restantes. O aparecimento do metano de forma significativa surge após um período que pode variar entre 6 meses até 2 anos após a disposição dos resíduos, porém varia de acordo com o tipo de resíduo e da quantidade existente no aterro. O metano percola as regiões de baixa pressão do solo até atingir a atmosfera. Parte dessa concentração gerada é oxidada pelo solo e forma o dióxido de carbono, sendo a fração que atinge a atmosfera de concentração de 90% da inicial gerada. O metano então é lançado na atmosfera ou reaproveitado, sendo queimado e utilizado (LIPTAY *et al.*, 1998 *apud* ZANETTI, 2009). Os sistemas mais eficientes captam aproximadamente 75% do biogás gerado, porém, na maioria dos casos, a eficiência está entre 40 e 60% (BARLAZ *et al.*, 2004 *apud* SOARES, 2011).

As bactérias metanotróficas [12] são as responsáveis por essa oxidação biológica do gás metano nos aterros e utilizam o metano como substrato para geração de energia, formando dióxido de carbono e água. Essa ação é catalisada pelo aporte de oxigênio, próximo da superfície dos aterros. O uso do metano como substrato por essas bactérias é possível graças a presença de uma enzima denominada metano-monoxigenase que oxida o metano, produzindo metanol com geração de duas moléculas de água. O metanol produzido é transformado em formaldeído, o qual é aproveitado nas rotas subsequentes. O processo de oxidação do metano nos aterros dependerá de diversos fatores ambientais e físico-químicos, que abrangem tanto variáveis geotécnicas quanto microbiológicas do solo. Entre as variáveis estão o teor de umidade do solo de cobertura, as concentrações de nutrientes e a presença de elementos tóxicos no solo. Quanto ao controle das emissões de metano nos aterros, este pode ser realizado através de vários mecanismos, entre eles, a queima através do *flare* após a sua captação, combustão

[12] Os micro-organismos metanotróficos podem ser divididos em dois grupos fisiológicos: Tipo I e Tipo II. O Tipo I (*Methylomonas, Methylocaldum, Methylosphaera, Methylomicrobium e Methybacter*) assimila o formaldeido produzido pela oxidação do metano, utilizando a rota da monofosfato ribulose. O Tipo II (*Methylocystis* e *Methylosinus*) utiliza a rota da serina para a assimilação do formaldeído (HANSON; HANSON, 1996; MURREL; McDONALD; BOURNE, 1998; McDONALD *et al.*, 2008 *apud* TEIXEIRA, 2009).

e a geração de energia e por via biológica através da oxidação bacteriana dos aterros e biofiltros (TEIXEIRA, 2009).

A geração *per capita* de resíduo no Brasil varia entre 0,4 e 0,7 Kg e possui uma média de 520 Kg por dia. A tendência é que cada vez mais essa média aumente, em função de diversos fatores, entre eles o aumento da densidade populacional nas grandes cidades e o aquecimento da economia. Políticas de reciclagem e conscientização ambiental devem ser implementadas para diminuir os impactos (SALOMON, 2009).

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 1996), os aterros são responsáveis pelo lançamento de 5-20% de metano na atmosfera, sendo enquadrados nas emissões de ações antropogênicas, em todo o mundo. A Tabela 3.12 mostra as emissões, em $MtCO_2eq$, em alguns países (USEPA. 2006).

Tabela 3.12 - Emissões de metano dos aterros – 1990-2000 (MtCO2eq).

País	1990	1995	2000
Estados Unidos	172,2	162,4	130,7
China	40,4	42,6	44,6
México	26,0	28,5	31,0
Canadá	18,5	20,4	22,9
Federação Russa	37,8	37,8	35,1
Arábia Saudita	12,5	14,4	16,8
Índia	10,7	12,2	13,9
Brasil	13,0	14,5	15,6
Ucrânia	14,2	14,5	12,1
Polônia	16,1	15,9	17,0
África do Sul	14,1	15,2	16,3
Turquia	8,2	8,9	9,7
Israel	6,6	7,8	8,8
Austrália	7,5	8,3	8,0
República do Congo	5,0	5,9	6,4
Demais	358,7	360,4	341,6
Total	761,4	769,7	730,3

Fonte: USEPA, 2006

Os Estados Unidos são os maiores emissores de metano proveniente de aterros do mundo, porém observa-se um declínio dessa parcela de contribuição em função da chamada "*Landfill Rule*", de 1996, e do aproveitamento dos gases emitidos. Países como a Ucrânia e Polônia apresentam uma gradual diferença, pois estando independentes há pouco tempo, podem iniciar suas próprias políticas de manejo de resíduos e geração de metano.

Amparados pelo Protocolo de Quioto vários projetos estão sendo implementados tendo como base os chamados Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), bem como a geração de várias medidas para aumentar o aproveitamento energético do gás vindo dos aterros e gerar receitas (LEITE, 2005). O potencial econômico total para a redução das emissões de metano de aterros em 2030 é estimado em mais de 1000 $MtCO_2eq$, que equivale a 70% das emissões estimadas (IPCC, 2007).

A Tabela 3.13 mostra as reduções de emissões esperadas em projetos baseados nos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo. A maioria dos projetos está relacionada à captura e aproveitamento do biogás nos aterros. No final de 2009,

60% das reduções propostas correspondiam a projetos relacionados aos aterros sanitários (UNEP RISOE, 2009 *apud* ZANETTI, 2009).

Tabela 3.13 - Reduções de emissões esperadas com projetos MDL.

Categoria	Registrados		Total esperado	
	Projetos	kRCEs (2012)[13]	Projetos	kRCEs (2012)
Metano	274	60441	529	119449
Gás de aterro	136	147666	277	209586
Total em biogás	410	208107	806	329035

Fonte: UNEP RISOE 2009 *apud* ZANETTI, 2009

Apesar de todo o esforço e das políticas governamentais, as taxas de metano tendem a aumentar nos países em desenvolvimento. Programas de reciclagem e reuso nos países desenvolvidos serão os responsáveis pela queda dessa taxa. A Tabela 3.14 mostra as emissões projetadas entre 2005 e 2020.

Tabela 3.14 - Emissões projetadas de metano dos aterros – 2005-2020 (MtCO2eq).

País	2005	2010	2015	2020
Estados Unidos	130,6	125,4	124,1	123,5
China	46,0	47,5	48,8	49,7
México	33,3	35,5	37,4	39,2
Canadá	25,3	27,7	30,7	33,6
Federação Russa	34,2	33,2	32,2	31,1
Arábia Saudita	19,4	22,1	24,8	27,5
Índia	15,9	17,1	18,1	19,1
Brasil	16,6	17,5	18,3	19,0
Ucrânia	13,4	14,7	16,4	18,0
Polônia	17,0	17,0	17,0	17,0
África do Sul	16,8	16,6	16,4	16,2
Turquia	10,4	11,0	11,6	12,1
Israel	9,7	10,6	11,3	11,9
Austrália	8,7	9,4	10,6	11,9
República do Congo	7,4	8,6	9,8	11,2
Demais	342,7	346,7	360,5	375,9
Total	747,4	760,6	788,0	816,9

Fonte: USEPA, 2006

[13] RCE – Redução Certificada de Emissão ou *Certified Emission Reductions*, em inglês.

CAPÍTULO 4

4. Análise Econômica

Este capítulo tem como finalidade abordar conceitos relevantes para interpretação da análise, bem como permitir o entendimento da terminologia empregada nesta dissertação.

Serão utilizados quatro indicadores: Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno, Taxa Mínima de Atratividade dos projetos e *Payback*.

4.1 – Introdução

A decisão de investir em um determinado projeto é realizada a partir de resultados de projeções econômicas e financeiras, sendo estas informações de grande importância para os financiadores. Do ponto de vista corporativo, o investimento deve gerar receita para empresa, aumentando assim a sua riqueza.

Segundo FAMÁ e BRUNI (2003 *apud* PADOVEZE, 2006):

> "Um investimento pode ser caracterizado genericamente como um sacrifício hoje em prol da obtenção de uma série de benefícios futuros. Em finanças, os conceitos de sacrifícios e benefícios futuros estão associados aos fluxos de caixa necessários e gerados pelo investimento. Assim, a análise de investimentos consiste, basicamente, em uma analise de projeção de fluxos de caixa."

Os investimentos podem ser tratados como aplicações de recursos que visam produzir um benefício futuro, ou seja, os recursos produzirão, em certo tempo, algum retorno que seja capaz de compensar a privação ao seu uso durante um determinado período. Todo esse processo deve estar alinhado com a meta da empresa de maximização de riqueza de seus proprietários acionistas.

A análise faz-se necessária, pois visa a alocação correta do capital investido, mesmo porque haverão outras prioridades, bem como restrições de ordem física e orçamentária.

Variáveis como custo de capital, custos operacionais, preços, rentabilidade, margens, oportunidades, volumes operados, taxas de risco e de atratividade são importantes para a análise do projeto. Desta forma, o analista tende a mitigar os riscos e diminuir as incertezas, maximizando a criação de valor para os investidores (MARQUEZAN, 2006).

Administrar um projeto para a geração de riquezas significa gerar valor para os acionistas. Desta maneira, surge o conceito de geração de valor econômico para os projetos. Segundo MARTIN e PETTY (2004 *apud* PADOVEZE, 2006):

> Os gestores geram valor para o acionista ao identificar e empreender investimentos que obtêm um retorno maior do que o custo para a empresa de levantar o capital. Quando fazem isso, há um beneficio adicional à sociedade. A competição entre empresas por fundos que financiam seus investimentos atrai o capital aos melhores projetos e a economia como um todo se beneficia.

Conclui-se, portanto, que investir faz com que a empresa prospere, gere empregos e satisfaça as necessidades dos consumidores ou clientes. Segundo RODRIGUES e MENDES (2004, *apud* PADOVEZE, 2006) ainda que o investimento resulte em crescimento, ele é a condição básica para o crescimento do negócio, beneficiando aqueles que aplicaram recursos para tornar factível o empreendimento. O aumento de valor do negócio traduz a valorização do capital próprio aplicado pelos acionistas, além de tranquilizar os credores que financiaram parte dos investimentos.

A lógica em longo prazo é a que rege decisões estratégicas, necessitando saber como a empresa se comportará no futuro, em função de um investimento realizado hoje. Não se trata de uma decisão rotineira ou operacional. Essas decisões implicam em dispêndio de capital cujos resultados são desconhecidos, porque ocorrerão no futuro, ou seja, representam um risco (OLDCORN & PARKER, 1998 *apud* CURY, 2007).

Decisões de investimento definem a direção estratégica da empresa, tendo em vista que mudanças para novos produtos, serviços ou mercados, são sempre precedidas de investimento de certo capital. Para que tal investimento seja aplicado, há necessidade da elaboração, avaliação e seleção de propostas, ou seja, de um plano detalhado em que são demonstradas as entradas e saídas de capital, durante certo período futuro, resultantes da aplicação de recursos em ativos fixos (BARBOSA, 2008).

Podem existir 4 tipos de propostas de investimentos, conforme mostrado a seguir:

- Propostas independentes: a aceitação de um projeto não exclui automaticamente os demais projetos que estão sendo comparados. O critério de escolha por um dado projeto, nesse caso, pode ser em função de restrição orçamentária. A escolha recai naquela que possui maior atratividade econômica;

- Propostas colidentes: A aceitação de um projeto elimina os demais comparados. Os projetos não possuem a mesma finalidade, porém competem entre si;

- Propostas excludentes mutuamente: A aceitação de um dado projeto elimina os outros. São projetos que possuem a mesma finalidade. Também são projetos que competem entre si;

- Propostas Contingentes: A tomada de decisão pela aceitação de uma proposta dependerá de outras decisões, ou seja, os seus resultados dependerão de outros projetos.

Diante desse contexto, apresentam-se, em seguida, as ferramentas e alguns conceitos de Finanças Corporativas que serão utilizadas na análise do presente trabalho.

4.2 – Conceitos de Finanças Corporativas

Taxa de Juros: Pode também ser chamada de Taxa de Crescimento do capital e refere-se à taxa de lucratividade recebida em um investimento. Em regra geral, é apresentada em bases anuais, podendo também aparecer em bases semestrais ou até mesmo diárias e representa um incremento da aplicação do capital em algum investimento.

Risco: Grau de Incerteza de pagamento da dívida. Considera-se aqui, por exemplo, os antecedentes do cliente, bem como seu comportamento financeiro.

Lucro: Trata-se da parte compensatória, ou seja, pode ser definido como sendo o ganho liquido efetivo.

Dinheiro no tempo: Esse termo surge da relação entre juros e tempo. O dinheiro pode ser reajustado em um determinado período de tempo considerando-se uma determinada taxa de juros. Reconhece aqui que uma determinada unidade monetária hoje não terá o mesmo valor que amanhã. Assim, um dólar hoje vale mais que um dólar amanha e isso independe do índice da inflação apurado no mesmo período.

Diagramas de Fluxos de Caixa: São as entradas e saídas de caixa e é representado por um Diagrama dos Fluxos de Caixa ou *Cash Flow*. Essa representação é uma reta horizontal, onde em uma determinada escala de tempo são traçadas as entradas e saídas (Figura 5.1). O número de períodos considerado no diagrama é chamado de Horizonte de Planejamento (CURY, 2007).

Na análise de investimentos considera-se o fluxo de caixa projetado, demonstrando previsões de ingressos e desembolsos, segundo premissas escolhidas pelo investidor.

As principais movimentações de um fluxo de caixa são:

- Investimento inicial: É o capital investido inicialmente no projeto. É nele que o investidor deseja obter retorno futuro e caracteriza-se por todos os investimentos realizados como, por exemplo, aquisições de ativos fixos, prédios, equipamentos, terrenos, máquinas, etc;

- Receitas operacionais: São os fluxos de entrada e representam o recebimento relacionado ao projeto;

- Custos e despesas: Tratam-se dos dispêndios do projeto. Referem-se a constante implementação do projeto.

Um fluxo de caixa pode ainda ser identificado como convencional e não convencional. No primeiro, ocorrerá uma única saída e sucessivas entradas no fluxo, enquanto que no segundo tipo, um fluxo de saída de caixa não é seguido por apenas uma série de fluxos de entrada. Em um dado tempo, poderá ocorrer o dispêndio de um montante para uma revisão de um equipamento comprado, por exemplo.

Conforme a Figura 4.1, segundo convenções, os vetores orientados para cima representam os valores positivos de caixa, ou seja, os benefícios, recebimentos ou receitas. Já os vetores orientados para baixo referem-se aos valores negativos, ou seja, os custos, desembolsos ou despesas.

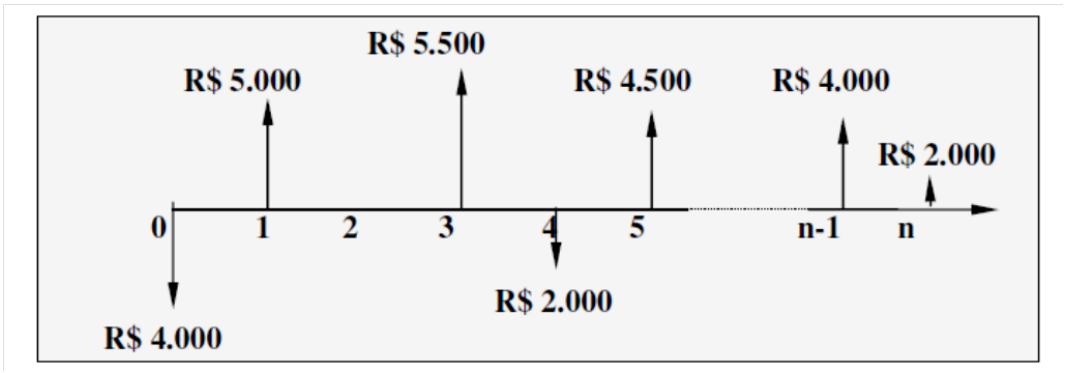

Figura 4.1 - Representação de um Diagrama de Fluxo de Caixa.
Fonte: CURY, 2007 - FGV – Finanças Corporativas

No processo de avaliação de investimentos há ainda a necessidade de considerar a taxa de inflação no período analisado pelo fluxo de caixa e deverão ser

considerados em termos reais e não nominais. Para isso, os fluxos de caixa devem ser descontados utilizando o índice de inflação naquele período (BARBOSA, 2008).

4.3 – Taxa Mínima de Atratividade

É a taxa mínima de retorno que o investidor pretende conseguir em função do investimento que realizou inicialmente, ou seja, é o retorno que aguarda pelo capital empregado no projeto. Pode ainda ser definida como sendo a taxa de juros que o capital seria remunerado em outra melhor alternativa de utilização, além do projeto em estudo. Isso pode ser traduzido no entendimento dos órgãos financiadores que o custo de investir certo capital em um dado projeto corresponde ao possível lucro perdido pelo fato de não considerar alternativas de investimentos viáveis no mercado.

As taxas utilizadas de TMA, em média no Brasil, variam de 12 até 18% ao ano, porém não deve excluir a possibilidade de ajustes ao longo do tempo para diferentes riscos nos diversos projetos considerados (CURY, 2007).

4.4 – Valor Presente Líquido

O Valor Presente é um conceito matemático apresentando uma indicação do valor total de uma série uniforme de capitais futuros, descontados a uma determinada taxa de juros compostos, por seus respectivos prazos. O Valor Presente Líquido é a soma algébrica dos fluxos de caixa descontados para o instante presente, também com uma taxa de juros denominada de *i* (MARQUEZAN, 2006). Na prática, trata-se de uma técnica de análise, onde subtrai-se o investimento inicial dos seus fluxos de entrada, estando toda a operação governada por uma taxa de mínima de atratividade ou a um dado custo de capital da empresa.

Na verdade, tal método mostra, na hora da análise de escolha, quanto as receitas subtraídas das despesas, acrescidas de uma taxa, representam monetariamente. Neste método é considerado o valor do dinheiro no tempo.

O Valor Presente Líquido, além de considerar o valor do dinheiro no tempo, é considerada uma ferramenta sofisticada de orçamento de capital. Esta ferramenta é

uma das mais utilizadas para a tomada de decisão ao analisar investimentos e foi discutida pela primeira vez por Hirshleifer, em 1958 (URTADO, 2010).

A Equação 4.1 mostra o cálculo deste indicador:

$$VPL\ (i) = \sum_{j=0}^{n} \frac{FC_j}{(1+i)^j} \qquad (4.1)$$

Onde:

i é taxa de desconto (custo do capital);
j é o período genérico (*j=0 a j=n*), percorrendo todo o fluxo de caixa;
FC_j é um fluxo genérico para t = [*0...n*] que pode ser positivo (ingressos) ou negativo (desembolso);
VPL (i) é o valor presente liquido descontado a uma taxa *i* e
n é o número de períodos do fluxo.

A tomada de decisão sobre essa métrica é realizada da seguinte forma:

- Se o VPL > 0 = projeto aceito
- Se o VPL < 0 = projeto negado

Um investimento deve ser realizado se o valor for positivo e rejeitado se for negativo. Podem ocorrer casos onde o valor seja exatamente igual a zero e caso ocorra, fica indiferente entre realizar ou não o investimento.

Se existirem mais opções de projetos, a escolha recai sobre aquele que possuir maior VPL positivo, considerando para tanto o mesmo horizonte de tempo. O critério de VPL estabelece que enquanto as parcelas de entrada forem maiores que as de saída, calculadas pela Taxa Mínima de Atratividade (TMA), o projeto deve ser aceito (CURY, 2007).

A TMA é a taxa a partir da qual o investidor considera que está obtendo lucros financeiros, a partir da aplicação de seus recursos.

Três componentes devem ser destacados para a referida taxa (BARBOSA, 2008):

- Custo de oportunidade: representa os rendimentos obtidos em alternativas que não as analisadas;

- Risco do negócio: quanto maior o risco, maior deverá ser o retorno;

- Liquidez: é a capacidade que a empresa possui de sair de uma posição e assumir outra no mercado.

Porém, o VPL tem como desvantagem a necessidade de escolher de forma correta as taxas de desconto ou da TMA. Um dos pontos fortes de tal métrica é a inclusão clara de todas as entradas e saídas, bem como o custo de capital, além da informação sobre o aumento ou decréscimo do valor da empresa.

Importante destacar que todos os dados que participam do cálculo de VPL são estimativos, pois o objetivo do cálculo é medir a potencialidade de uma ideia, intencionando antecipar bons resultados em um futuro (CURY, 2007).

4.5 – Taxa Interna de Retorno (TIR)

Esta taxa indica a rentabilidade de um investimento por uma unidade de tempo (MOTTA e CALÔBA, 2002 *apud* MARQUEZAN, 2006). O fluxo de caixa é iniciado com o valor de investimento (desembolso). As demais parcelas indicam receitas e despesas.

A Taxa Interna de Retorno é a taxa de desconto que iguala, em um dado momento, as entradas com as saídas previstas de caixa. Geralmente, utiliza-se a data de início do projeto (investimento) como sendo o momento zero (ASSAF NETO, 2002 *apud* PADOVEZE, 2006).

Para a tomada de decisão, deve-se analisar o valor obtido para a taxa. Se for maior que o retorno exigido, o projeto é aceito. Caso contrário, o projeto é recusado. Assim, quanto maior for a TIR, maior a atratividade do projeto, como segue:

- TIR > TMA – o projeto deve ser aceito;
- TIR = TMA – é indiferente aceitar ou rejeitar o projeto;

- TIR < TMA – o projeto deve ser rejeitado.

Existem algumas restrições para o emprego da TIR (CURY, 2007). Entre elas:

- Quando os projetos possuírem dois ou mais períodos e necessitarem que seus investimentos sejam anteriores aos benefícios;
- Quando estiver havendo comparação entre projetos mutuamente exclusivos e com o mesmo período de tempo;
- Não pode ser utilizada como critério de escolha ou de ordenação para projetos cujo gestor esteja passando por restrições orçamentárias.

Muitos gestores preferem trabalhar com a TIR ao VPL. Isso porque existe uma atenção maior para a rentabilidade do que com a maximização do valor da empresa (EDER, 2004).

4.6 – Payback

O *Payback* ou *Payout* determina o prazo de recuperação do valor investido. Trata-se de uma metodologia que visa mensurar o tempo necessário para que os recursos empregados inicialmente sejam recuperados em um projeto (BRAGA, 1998 *apud* BARBOSA, 2008). Essa ferramenta é capaz de sinalizar para o investidor se o projeto é atraente ou não, porém nunca deve ser utilizada de forma isolada, pois não considera o custo do capital, o valor do dinheiro no tempo e os fluxos de caixa (MARQUEZAN, 2006). Pode ainda ser chamado de repagamento do investimento ou empréstimo (URTADO, 2010). Trata-se de um método simples e fácil na sua utilização, porém cabe sinalizar que considera os fluxos de caixa e não o lucro apurado contabilmente.

Utilizando essa metodologia como uma das ferramentas para análise de viabilidade de projetos, deve-se estipular um período máximo aceitável, sob o qual projetos com períodos superiores serão rejeitados e períodos inferiores ou iguais serão aceitos (GITMAN, 2001 *apud* BARBOSA, 2008).

Alguns autores referem-se ao *Payback* como sendo um Período de recuperação, ou seja, o tempo necessário para que o dispêndio de capital seja

recuperado por meio de benefícios que aparecerão no fluxo de caixa (incrementais líquidos) promovidos pelo investimento inicial (ASSAF NETO, 2003 *apud* PADOVEZE, 2006).

Alguns autores criticam o uso do *Payback*, pois ele não reconhece as entradas previstas após a recuperação do capital investido, além de não reconhecer também o montante do capital no tempo, ou seja, não considera o custo do dinheiro ou juros sob ele no período determinado (BRAGA, 1998 *apud* BARBOSA, 2008).

A fim de corrigir essa distorção, conforme ocorre com o cálculo do Valor Presente Líquido, pode-se considerar então o cálculo com uma taxa de desconto para os fluxos de caixa em cada período. Quando isso ocorrer, tem-se o chamado *Payback* Descontado. Essa taxa considera o valor do dinheiro no tempo existente nos vários fluxos de caixa e confronta esse resultado com o valor do investimento.

Porém, nem o *Payback* descontado considera o fluxo de caixa após o período estipulado e ambos podem influenciar diretamente nas escolhas apresentadas. Analistas defendem o uso do *Payback*, pois, segundo eles, trata-se de um indicador importante do nível de risco do projeto, expressando de forma clara o tempo de resgate do montante empregado e assim, quanto maior o tempo de retorno, mais exposta estará a empresa, visto que parte do seu capital está comprometida naquele investimento, diminuindo assim a sua liquidez.

CAPÍTULO 5

5. Estudo de caso: ETE Palatinato

5.1 – Histórico

O município de Petrópolis foi concebido pelo engenheiro alemão Julio Frederico Köeler (1843), a pedido do Governo Imperial. O projeto contemplava a preservação da vegetação, bem como o uso do solo para finalidade agrícola. A colônia agrícola fracassou, pois os solos não apresentaram o rendimento esperado. Além disso, os colonos que chegaram tinham conhecimento em artesanato e algumas áreas industriais, dificultando a implantação da agricultura, porém facilitando o crescimento industrial (OLIVEIRA, 2005).

Na segunda metade do século XIX, rapidamente, as indústrias ultrapassaram a agricultura e o crescimento industrial tornou-se responsável pela migração de mão de obra de diversas localidades, inclusive da Europa. Com isso, o município de Petrópolis desenvolveu-se com base industrial, iniciando em 1870 com a instalação maciça de diversas indústrias, incluindo as diversas indústrias têxteis, papel e papelão, metalúrgica e teve a sua expansão até meados da década de 1960. Hoje, a cidade de Petrópolis apresenta 95,1% (281.286 hab) da sua população nos centros urbanos e apenas 4,9% em localidades rurais (14.631 hab. – IBGE - Censo 2010).

A bacia hidrográfica do rio Piabanha possui 74 km de extensão e é uma das sub-bacias formadoras do rio Paraíba do Sul em seu trecho fluminense e abrange uma das mais desenvolvidas áreas industriais do país e compreende a Macrorregião Ambiental 6 (KLING, 2005). A bacia compreende uma área aproximada de 2.000 km², abrangendo os municípios de Petrópolis, Teresópolis, Areal e São José do Vale do Rio Preto e ainda parte dos municípios de Paty do Alferes, Paraíba do Sul e Três Rios.

O rio Piabanha é o principal receptor dos despejos industriais e domésticos das sete cidades, com uma vazão média de 38 m^3/s (CEIVAP, 2002 *apud* KLING, 2005). As fontes de poluição ocorrem, principalmente, pelas atividades relacionadas às indústrias alimentícias e têxteis e, em menor extensão, às metalúrgicas e

gráficas, localizadas nos municípios de Teresópolis e Petrópolis. A população total da bacia do rio Piabanha, baseado no censo IBGE 2010, está em torno de 588 mil habitantes dos quais 90% em áreas urbanas. Somente os municípios de Petrópolis e Teresópolis, juntos, respondem por cerca de 90% da população total (KLING, 2005)

Um dos objetivos da Lei 9433, de 8 de janeiro de 1997, foi a criação do Sistema de Informações de Recursos Hídricos, que tem como finalidade divulgar dados e informações qualitativas e quantitativas de todo o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

As bacias do Rio Paraíba do Sul e Oeste da Baía da Guanabara apresentam um significativo grau de degradação ambiental provocado pela urbanização e industrialização descontrolada e acelerada. Dentre alguns dos principais afluentes dessas bacias podem-se citar os rios Quitandinha e Palatinato, pertencentes ao município de Petrópolis.

Inserido neste contexto, existe o Programa para Despoluição da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul (PRODES), que tem como objetivo o financiamento de ações que promovam a despoluição das bacias hidrográficas, tais como implantação de sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário nos municípios da bacia, tratamento de efluentes industriais, fiscalização, controle de erosão e educação ambiental.

Em Petrópolis, no estado do Rio de Janeiro, encontra-se o rio Palatinato que deságua no rio Piabanha, que é um dos principais afluentes do rio Paraíba do Sul (LERMONTOV, 2005). Em um determinado trecho desse rio, encontra-se a ETE Palatinato em coordenadas UTM (N - 7509105; E - 688043). Esta estação de tratamento de esgoto pertence a Águas do Imperador S/A, sendo esta uma das empresas geridas pelo Grupo Águas do Brasil, que tem sob a sua gestão de capital privado os serviços de saneamento em vários municípios, atuando nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e em Manaus, no estado do Amazonas.

A ETE Palatinato foi projetada para atender aproximadamente 50000 habitantes e recebe esgoto sanitário dos bairros Morin, Alto da Serra e do centro da cidade, denominado de Centro Histórico, reunindo as contribuições na Praça dos Expedicionários, próxima ao Teatro Municipal de Petrópolis, onde existe implantada uma estação elevatória que promove o recalque dos esgotos até a ETE Palatinato. A

estação atende 190 L/s e foi projetada para atender uma vazão máxima de 237 L/s (LERMONTOV, 2007).

5.2 – Tratamento

O esgoto proveniente da bacia do Palatinato é recebido em uma estação elevatória provida de dispositivo de gradeamento grosso, que tem a função de reter sólidos grosseiros, ocorrendo em seguida o bombeamento do esgoto até a entrada da estação.

O esgoto é conduzido ao pré-tratamento, passando por duas etapas de gradeamento, de modo a remover sólidos grosseiros que poderiam obstruir as tubulações na sequencia do tratamento. Esses sólidos retidos são conduzidos, através de dutos, até uma caçamba para o seu posterior transporte para um aterro sanitário.

Em seguida, esse fluxo passa por uma caixa de areia, onde parte dos sólidos em suspensão é retida. O fluxo então é conduzido a uma calha *Parshall* – onde é realizada a medição de vazão da unidade.

Após a calha *Parshall*, o fluxo é dividido em diversas correntes e conduzido, por gravidade, ao fundo do biodigestor anaeróbio de fluxo ascendente (reator anaeróbio de fluxo ascendente - RAFA), com leito de lodo, através de tubos de polietileno de alta densidade (PEAD), com diâmetros de 63 mm, localizados nas caixas de distribuição. No biodigestor, os micro-organismos anaeróbicos promovem a biodegradação da matéria orgânica transformando-a em metano e gás carbônico.

Nesse tipo de reator ocorre a retenção de sólidos no fundo do tanque, chamado de leito de lodo. Como o esgoto bruto é distribuído de forma uniforme sobre o leito, promovendo melhor contato entre as bactérias e a matéria orgânica, a eficiência do metabolismo celular é maior. Com isso, ocorre o enriquecimento da concentração de bactérias e, consequentemente, aumenta a biodegradação da fração orgânica do esgoto.

A retirada de excesso de lodo acumulado no fundo do reator é efetuada por gravidade para o tanque de lodo através de registros de fundo, adjacentes ao tanque do reator. Do tanque de lodo esse lodo é conduzido para a centrifuga para que

ocorra o seu adensamento e retirada de excesso de liquido. O lodo retirado é conduzido para um aterro sanitário.

Com o tanque fechado, o gás formado é tubulado e encaminhado ao selo hidráulico, e posteriormente queimado, onde encontra-se instalada uma válvula corta chamas.

Após a fase de tratamento no reator anaeróbio, o esgoto é conduzido por canaletas laterais seguindo, por gravidade, até a sua entrada no tanque aeróbio com biodiscos.

No primeiro tanque com biodiscos, a carga poluidora sofre uma oxidação biológica efetuada por bactérias aeróbicas fixadas nos discos internos do reator. Nessa fase espera-se uma redução de carga orgânica de, no mínimo, 60%. Em seguida, o esgoto segue para um segundo tanque, obtendo uma redução complementar, totalizando 75% de remoção.

Através do dispositivo "*air-lift*"[14], parte do lodo acumulado no fundo do decantador retorna para o tanque do biodisco inicial e a outra fração retorna para a elevatória de onde é recalcado para a entrada da estação e segue até o reator aneróbico.

Após passar pelo decantador secundário para a remoção do lodo biológico, o fluxo segue para um canal de desinfecção, onde recebe a adição de solução de hipoclorito de sódio, seguindo para o rio Palatinato.

Em resumo, o processo de tratamento foi concebido de tal forma que o esgoto passa inicialmente por um digestor aneróbico, seguido de um processo aeróbico, com emprego de reatores rotativos de leito imobilizado, passando por um decantador secundário e finalmente por um tanque de contato para desinfecção do esgoto tratado. O esgoto tratado pelas reações anaeróbicas é encaminhado para o reator aeróbio por canaletas instaladas na parte superior e por gravidade entra no tanque aeróbio, para receber o polimento final.

A eficiência global do sistema é maior que 90% de remoção de DBO e o efluente da saída possui DBO inferior a 40 mg/L, conforme exigência da legislação vigente.

Os dados do projeto são os seguintes (PROACQUA, 2001):

[14] Sistema de elevação por ejetor a ar comprimido. Esse sistema é utilizado para retirar o lodo retido no fundo do decantador que retorna para o tanque do reator.

- Vazão média do projeto: 158,01 L/s (568,8 m^3/h);
- Vazão máxima: 237 L/s (853,2 m^3/h);
- Concentração de DBO: 188 mg/L;
- Carga orgânica total gerada: 2567,3 Kg DBO/dia.

A planta, com a implementação do projeto de biogás, é apresentada na Figura 5.1.

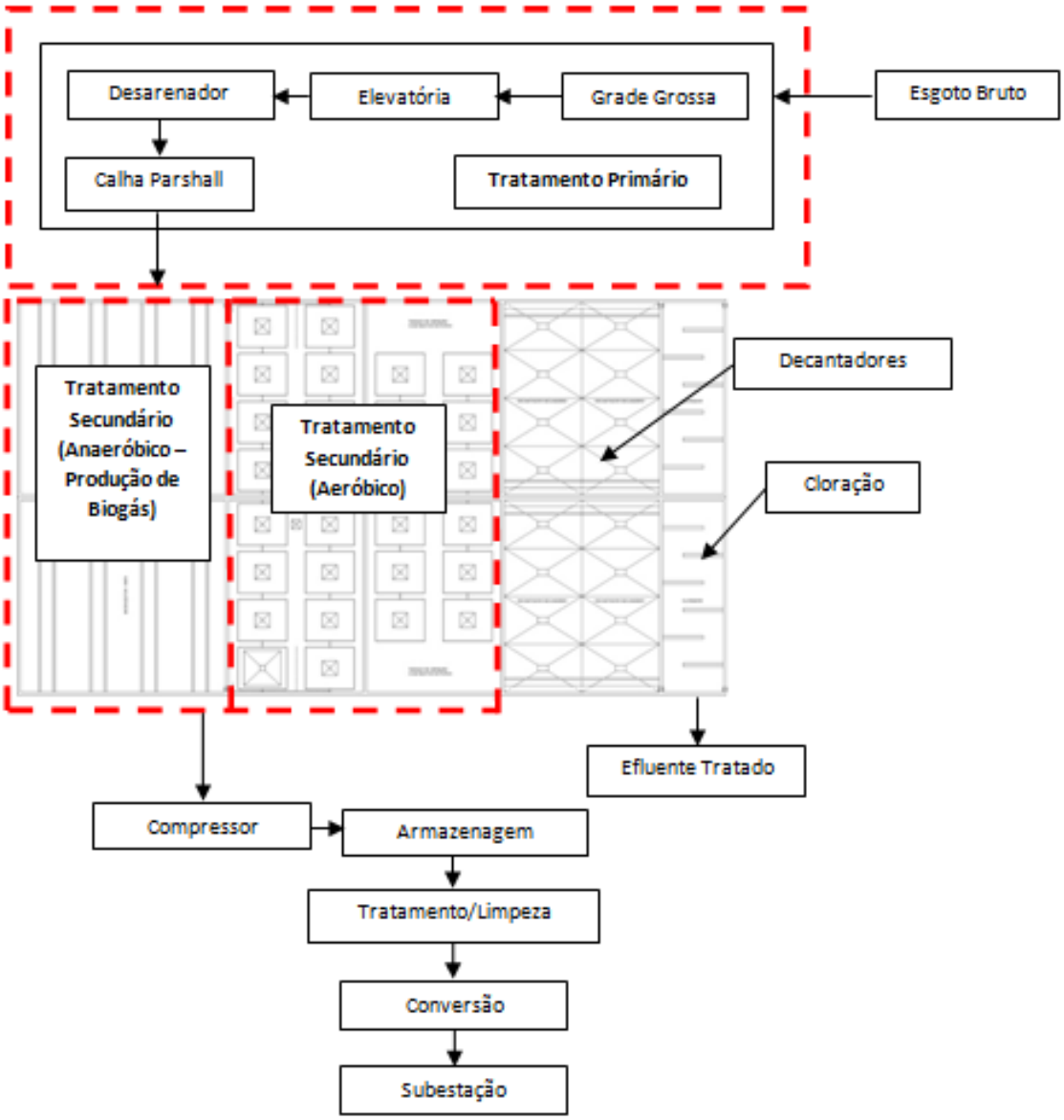

Figura 5.1 - Diagrama de Blocos da Planta de Tratamento ETE Palatinato.
Fonte: Elaboração própria

5.3 – Tarifação e consumo energético

O consumo desencadeado de recursos naturais ocasiona vários efeitos deletérios no meio ambiente, principalmente na exploração de fontes energéticas baseadas em combustíveis fósseis. Esses combustíveis ainda são responsáveis por emissões de gases que causam o efeito estufa (DIAS, 2007 *apud* SANTANA, 2010). Além disso, a perspectiva de desabastecimento e a constante instabilidade do preço do petróleo reforçam a necessidade de substituição dessas fontes por alternativas de baixo custo e baixo grau poluidor.

Nesse cenário, o biogás apresenta-se como sendo um dos insumos energéticos que possuem um dos menores custos para o País. Sendo um dos resíduos gerados na decomposição orgânica proveniente da biomassa, trata-se de um insumo considerado limpo e sustentável. Lançado na atmosfera, sem tratamento, agrava o efeito estufa, pois seu principal componente, o metano, possui um potencial poluidor 21 vezes superior ao gás carbônico, quando comparados. Entretanto, é esse mesmo gás que confere ao biogás um poder calorífico que pode ser utilizado como insumo, sendo uma alternativa para substituição de combustíveis fósseis. Em muitos casos, o consumo de energia elétrica dentro da instalação é elevado, o que aumenta ainda mais o valor de custo de tratamento para o esgoto (LIMA, 2005 *apud* JUNIOR, 2008).

O aparecimento dos grandes núcleos urbanos fez com que os recursos naturais, sobretudo a água, passassem a ser consumidos de forma descontrolada. Esse cenário desencadeou uma série de problemas, sendo um deles a poluição hídrica e do solo, que quando combinada aos atuais padrões de consumo intensifica os problemas relativos à saúde pública (COHIM *et al.*, 2009 *apud* SANTANA, 2010).

No mundo e no Brasil, o uso do biogás como insumo energético ainda é pouco significativo. Nesse contexto, dados de 2003 relatam que a sua contribuição na matriz energética mundial foi de 18,1 TWh, sendo 9% de 200,7 TWh gerados a partir da biomassa como um todo (CORTEZ *et al*., 2008 *apud* OLIVEIRA, 2011). No Brasil, projetos isolados acontecem sem, muitas vezes, troca de experiências.

Surgem questionamentos sobre a possibilidade de geração de energia nas unidades de tratamento, visto que a meta é de ampliar para 88% o tratamento de esgoto coletado até 2030 (PLANSAB, 2011). No ramo do saneamento básico, utilizar o biogás, bem como o lodo, como insumo energético promove nesse sentido uma

política de sustentabilidade responsável e bem vista perante os órgãos e a sociedade.

As empresas que possuem esses resíduos originados dos seus processos estudam de que forma podem realizar aproveitamento energético e visam minimizar ou eliminar gastos. Os dados apontam que 1/3 do consumo de energia do setor público vem do saneamento – água e esgoto, sendo a eletricidade o 2° maior componente no custo operacional das companhias de saneamento (PLANSAB, 2011).

A energia elétrica é o principal insumo na cadeia de valor do saneamento, estando presente nas etapas fundamentais desde a captação até a recoleta e tratamento das águas residuárias e disposição nos corpos receptores. Os equipamentos motor-bomba absorvem 90% da energia elétrica utilizada nos sistemas de abastecimento (SANTANA, 2010).

Um dos usos sugeridos para o biogás gerado nas plantas de estação de esgoto espalhadas pelo país é a conversão em energia elétrica. Apenas o setor de saneamento foi responsável pelo uso de 2% de toda energia elétrica consumida no país (SNIS, 2007 *apud* SANTANA, 2010). Dentro de uma organização, representa junto a despesas com pessoas e produtos químicos, uma das maiores contas a pagar.

Segundo JORDÃO (2010), o consumo típico de energia elétrica para uma unidade de tratamento é de aproximadamente 320 kWh/1000 m^3. Esse consumo pode ser dividido da seguinte maneira:

- Aeração: 52%;
- Fase sólida: 30%;
- Recalque do efluente: 12%;
- Bombeamentos internos: 3%.

Vale lembrar que a remoção de nutrientes aumenta os custos de energia. Estudos teóricos de recuperação de energia para uma estação que atende 200.000 habitantes, com a máxima produção de gás, pode produzir até 4,6 x 10^6 kWh/ano (0,020*200.000 = 4.000 m^3 biogás/dia*22.400 = 8,96 x 10^7 kJ/dia = 3,27 x 10^{10}

kJ/ano), considerando a produção de 5 a 20 L de gás por pessoa por dia em uma estação convencional e poder calorífico do biogás de 22.400 kJ/m^3.

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica, as faturas de energia elétrica para os diversos consumidores podem ser cobradas tanto por nível de tensão utilizada (alta, média e baixa), como por classe de consumo (residencial, industrial, comercial, rural, serviços públicos, poderes públicos e iluminação pública). As empresas de operação de serviço de água e esgoto encontram-se classificadas na categoria Serviços Públicos e pertencem ao chamado de Grupo A. Essas empresas podem ser tarifadas através de duas modalidades: a convencional e horo-sazonal, esta última dividida em azul e verde (GOMES, 2009).

O tipo de tarifação que a ETE Palatinato recebe da concessionária responsável pelo fornecimento de energia elétrica "Ampla" é Verde – Média tensão – Sub-grupo A4 e a demanda contratada de potência é de 90 KW (ponta e fora da ponta), pagando cerca de R$ 0,24/kWh a R$ 1,71/kWh. Este fato resulta em um total de cerca de R$ 180.000 anuais, em média (incluindo impostos), somente em custos de energia elétrica.

5.4 – Metodologia

Para o estudo da produção e aproveitamento do biogás foram empregadas duas tecnologias de produção de biogás, onde foram considerados os respectivos investimentos em equipamentos, somados aos custos de operação e manutenção, sempre considerando os regimes de operação e do tempo de vida útil de cada tecnologia empregada.

Para os cálculos apresentados de potencial de produção de biogás para as duas tecnologias foi utilizada a mesma faixa de potência instalada de 50-60 kW, sendo que ambas as tecnologias são consideradas de pequeno porte.

Foi analisada a viabilidade de ambos os projetos em termos de Fluxo de caixa, tendo como dados, os custos com energia elétrica (pagos à concessionária local), a geração de kW/mês e a energia elétrica liquida entregue por cada tecnologia (em kWh e R$), além do Investimento (CAPEX[15]) e custos de Operação e

[15] CAPEX ou gastos em capital *(capital expenditures)* são despesas que produzem benefícios ao longo de um período futuro longo (superior a um ano). Ocorre quando uma empresa compra ativos (imobilizado) ou investe em ativos já existentes que possuam uma vida útil superior ao exercício em que ocorre a compra ou investimento.

Manutenção (O&M). Os valores para CAPEX e O&M foram pesquisados no mercado em empresas prestadoras deste tipo de serviço.

A produção teórica de biogás para a unidade foi calculada baseando-se na carga orgânica processada de 0,43 Kg DQO/m^3, considerando a vazão de 16.848 m^3/dia (195 L/s). O cálculo teórico de produção de biogás é de 101,87 m^3/h, em média, considerando a carga orgânica processada por dia igual a 7.245 Kg*75% (fator para biogás gerado) = 5.433,48 m^3/dia*0,45 (fator de metano gerado) = 2.445,06 m^3/dia. Porém, tratando-se de inicio de projeto e do desconhecimento de algumas variáveis do processo, o valor utilizado para calcular a operação de conversão do gás será 40 m^3/h.

Fatores como a altitude de operação (Petrópolis fica a 800 m de altitude do nível do mar) causam perda no rendimento do equipamento. Isso causa a redução de potência, geralmente de 3-4 kW, em função de baixas temperaturas.

Para as microturbinas, considerou-se pela produção de biogás e a sua total conversão em energia elétrica um sistema com uma potência nominal de 65 kW – com potência útil de 56 kW, sendo assim a unidade de conversão pode gerar aproximadamente 40.320 kWh/mês, equivalendo a aproximadamente R$ 17.000,00 de receita.

No caso dos motogeradores, a capacidade instalada de 50 kW, gera uma capacidade útil do sistema de 47 kW e tem-se uma geração de receita de aproximadamente R$ 14.500,00. Para ambos os cálculos, considerou-se o valor de R$ 0,42/kW pago à concessionária local. As empresas foram identificadas como empresa A (comercializa microturbinas) e B (comercializa motogeradores).

5.5 – Cálculo dos componentes de Fluxo de Caixa

Os cálculos de investimento, operação e manutenção foram estimados e orçados em empresas que disponibilizam serviços especializados na conversão de biogás em energia elétrica.

5.5.1 – Geração de Energia Elétrica com uma Microturbina

Para a realização da análise, alguns dados foram obtidos do fabricante das microturbinas Capstone, comercializadas pela empresa A. A Tabela 5.1 de CAPEX mostra os custos com os equipamentos, materiais e acessórios necessários. O "*overhaul*"[16] informado para a microturbina é de 40.000 horas.

Tabela 5.1 - Custo dos equipamentos, materiais e acessórios – Microturbina.

Equipamento	Quant.	Custo (R$)
Microturbina 65 kW	1	505.892,00[17]
Secador por refrigeração	1	
Filtros de ar	1	
Filtros de combustível	1	
Ignitor	1	
Injetores	1	
Baterias	1	
Termopares	1	

Fonte: Proposta Empresa A, 2012

Na Tabela 5.1 o total de investimento de R$ 505.892,00, inclui o skid de tratamento do biogás gerado (compressor, secador para retirar a umidade, sistema de filtragem para retirar as impurezas e um "*chiller*", para reduzir a temperatura do biogás após a compressão e retirar a umidade).

Em condições ISO[18] (temperatura ambiente e nível do mar), a microturbina opera com a geração de 65 kW, porém a unidade estudada localiza-se aproximadamente 800 m acima do nível do mar, fazendo com que haja um fator de correção quanto à temperatura e pressão de operação. Quando calculados, o aparelho perde eficiência, reduzindo a sua potência máxima. Desta forma, será considerada 56 kW de capacidade útil para o sistema.

5.5.2 – Geração de Energia Elétrica com um Grupo Motogerador

O fabricante informou um *overhaul* de 5.000 horas para o equipamento. A Tabela 5.2 (CAPEX) mostra os custos com os equipamentos, acessórios e materiais

[16] *Overhaul*: termo que define a necessidade de revisão ou troca completa de um determinado equipamento.
[17] Incluindo o sistema de tratamento (skid).
[18] ISO 554:1976 – *Standard atmospheres for conditioning and/or testing*

para a implantação de um sistema de conversão utilizando o grupo motogerador, comercializados pela empresa B.

Tabela 5.2 - Custo dos equipamentos, materiais e acessórios – Grupo Motogerador.

Equipamento	Quant.	Custo (R$)
Cogerador	1	92.939,00
Conjunto de banco de capacitores 15 KVAR-440 v	1	561,00

Fonte: Proposta Empresa B, 2012

O valor do projeto para o sistema é de R$ 93.500,00.

5.6 – Custos de Operação e Manutenção (O&M)

5.6.1 - Custos de Operação e Manutenção - Microturbina

Os custos que envolvem a operação e manutenção da microturbina são, em média, de R$ 90.000,00/ano, com o percentual de inflação de 7%/ano, em um horizonte de 10 anos de operação, conforme demonstrado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Operação e Manutenção - Microturbina.

Ano	Custos (R$)
1	65.000,00
2	69.550,00
3	74.418,50
4	79.627,80
5	85.201,74
6	91.165,86
7	97.547,47
8	104.375,80
9	111.682,10
10	119.499,85

Fonte: Proposta Empresa A, 2012

A manutenção programada para a microturbina consiste em trocar e limpar alguns de seus componentes, conforme a Tabela 5.4. O *overhaul* do sistema é de 40.000 horas, com uma média de manutenção de 6 horas por dia.

Tabela 5.4 - Manutenção programada – Microturbina.

Hora	Componentes	Inspeção
8000 horas	Filtros de ar	Trocar
	Filtros de combustível	
	Ignitor	
20000 horas	Injetores	
	Baterias[19]	
	Termopares	
40000 horas	Motor e gerador	

Fonte: Proposta Empresa A, 2012

5.6.2 - Custos de Operação e Manutenção – Grupo Motogerador

A Tabela 5.5 apresenta os custos com a manutenção do Grupo Gerador:

Tabela 5.5 - Operação e Manutenção – Grupo Motogerador.

Componentes	Inspeção	Intervalo (h)	Quantidade	Custo (R$)
Óleo lubrificante	Trocar	200	50	18.000,00
Filtro		1.000	10	5.950,00
Velas		1.000		
Rotor		1.000		
Correa dentada		1.000		

Fonte: Proposta Empresa B, 2012

A partir da Tabela 5.5 é possível obter o valor para o custo total de operação e manutenção quando a tecnologia do grupo gerador for empregada, ou seja, R$ 23.950,00, para um regime de operação de 10.000 horas. O *overhaul* do sistema é de 5.000 horas e custará R$ 20.000,00.

[19] Depende do modelo.

5.7 – Quadro Comparativo – Custo de geração

A Tabela 5.6 resume os valores de investimento e operação e manutenção, para as duas tecnologias propostas.

Tabela 5.6 - Quadro Comparativo das Tecnologias.

Itens	Unidade	Microturbina	Motogerador
Investimento total	R$	505.892,00	93.500,00
Volume de gás	m³/h	40	40
Capacidade instalada	kW	65	50
Capacidade útil	kW	56	47
Energia elétrica cedida	kW mês	40.320	33.840
Receita aproximada	R$	17.000,00	14.500,00
Custo total (O&M)	R$	Tabela 5.3	Tabela 5.5
Potência instalada	kW	65	50
Energia elétrica líquida	kW	56	47
Regime de operação	Horas	24	24
	Dias	30	30
"Overhaul"	Horas	40.000	5.000

Fonte: Elaboração própria

Adotou-se, para ambas as análises, o horizonte de 10 anos, visto que existem modelos de microturbinas, operados pela revendedora, que já operam além do período de *overhaul*.

5.8 – Discussão dos Resultados

Os fluxos de caixa projetados para as tecnologias comparadas são mostrados nas Tabelas 5.7 e 5.8, onde foram analisados os seguintes indicadores: VPL, TIR e *Payback*.

Tabela 5.7– Fluxo de Caixa – Microturbinas.

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O&M	65.000,00	69.550,00	74.418,50	79.627,80	85.201,74	91.165,86	97.547,47	104.375,80	111.682,10	119.499,85
Custo Total O&M	65.000,00	69.550,00	74.418,50	79.627,80	85.201,74	91.165,86	97.547,47	104.375,80	111.682,10	119.499,85
Ganhos Eletricidade	206.035,20	220.457,66	235.889,70	252.401,98	270.070,12	288.975,03	309.203,28	330.847,51	354.006,83	378.787,31
Ganhos Totais	206.035,20	220.457,66	235.889,70	252.401,98	270.070,12	288.975,03	309.203,28	330.847,51	354.006,83	378.787,31
Fluxo de Caixa Liquido	141.035,20	150.907,66	161.471,20	172.774,18	184.868,38	197.809,16	211.655,81	226.471,71	242.324,73	259.287,46
Fluxo de Caixa Cumulativo	-364.856,80	-213.949,14	-52.477,94	120.296,25	305.164,63	502.973,79	714.629,60	941.101,31	1.183.426,04	1.442.713,50
Fluxo de Caixa Descontado	125.924,29	120.302,67	114.932,01	109.801,12	104.899,28	100.216,28	95.742,34	91.468,13	87.384,73	83.483,62
Valor Presente Liquido (VPL)	-379.967,71	-259.665,05	-144.733,04	-34.931,92	69.967,36	170.183,64	265.925,98	357.394,10	444.778,83	528.262,46

Taxa Interna de Retorno (10 anos)	31%
Valor Presente Liquido (10 anos)	R$ 528.262,46
***Payback* (anos)**	4,26
Taxa Mínima de Atratividade	12%

Tabela 5.8 – Fluxo de Caixa – Motogeradores.

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O&M	63.950,00	67.026,50	70.318,36	73.840,64	77.609,48	81.642,15	85.957,10	90.574,10	95.514,28	100.800,28
Custo Total O&M	63.950,00	67.026,50	70.318,36	73.840,64	77.609,48	81.642,15	85.957,10	90.574,10	95.514,28	100.800,28
Ganhos Eletricidade	172.922,40	185.026,97	197.978,86	211.837,38	226.665,99	242.532,61	259.509,89	277.675,59	297.112,88	317.910,78
Ganhos Totais	172.922,40	185.026,97	197.978,86	211.837,38	226.665,99	242.532,61	259.509,89	277.675,59	297.112,88	317.910,78
Fluxo de Caixa Liquido	108.972,40	118.000,47	127.660,50	137.996,74	149.056,51	160.890,46	173.552,79	187.101,49	201.598,60	217.110,50
Fluxo de Caixa Cumulativo	15.472,40	133.472,87	261.133,36	399.130,10	548.186,61	709.077,07	882.629,87	1.069.731,35	1.271.329,95	1.488.440,45
Fluxo de Caixa Descontado	97.296,79	94.069,25	90.866,22	87.699,42	84.578,67	81.512,11	78.506,47	75.567,15	72.698,48	69.903,77
Valor Presente Liquido (VPL)	3.796,79	97.866,04	188.732,26	276.431,68	361.010,34	442.522,46	521.028,93	596.596,08	669.294,56	739.198,33

Taxa Interna de Retorno (10 anos)	125%
Valor Presente Liquido (10 anos)	R$ 739.198,33
***Payback* (anos)**	0,92
Taxa Mínima de Atratividade	12%

Conforme a classificação anteriormente citada na fundamentação teórica trata-se de projetos que competem entre si e possuem a mesma finalidade. Portanto, a escolha de um, eliminará o projeto comparado. Tratam-se de propostas mutuamente excludentes.

Durante o fluxo de caixa descontou-se o percentual de inflação, conforme o Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M). Considerou-se este índice de 7% (índice acumulado anual – Novembro de 2012). Assim, é possível obter os fluxos em termos reais, pois os resultados são afetados diretamente por esse índice.

Analisando o Valor Presente Liquido (VPL) dos fluxos de caixa descontados, com uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 12%, conclui-se que prevalece a viabilidade da tecnologia referente ao motogerador, quando comparada a da microturbina. Houve acúmulo de aproximadamente R$ 740.000,00 para o horizonte estudado, contra R$ 530.000,00 para microturbinas. Considerou-se no fluxo de caixa dos motogeradores para duas trocas anuais. Ambos os projetos apresentaram VPL positivo, no mesmo horizonte, ou seja, o investimento foi totalmente recuperado e ainda foi produzido um montante como lucro.

Na Figura 5.2 está demonstrado o *Payback* comparativo para dois projetos.

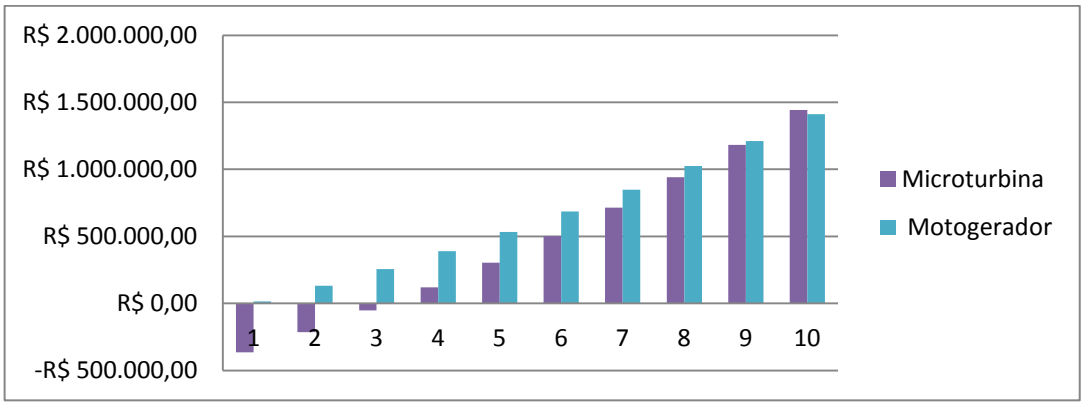

Figura 5.2 - *Payback* das Tecnologias
Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar o retorno positivo em anos diferentes para os projetos envolvidos. Para a microturbina, o *payback* sinalizou que entre o quarto e quinto ano (4,26 anos), todo o capital investido estará recuperado. No caso do motogerador, no regime de 24 horas e 7 dias na semana, o capital investido será recuperado já no

primeiro ano de operação (0,92 ano). Basicamente, os baixos valores de investimento e de manutenção corroboram para este resultado.

A análise do fluxo de caixa indicou que a tecnologia mais viável economicamente é a de motogeradores. A implantação desta tecnologia fica evidente devido ao baixo investimento e menor risco, visto que o retorno do capital investido acontecerá em menor tempo, de aproximadamente 1 ano.

Utilizando os montantes do fluxo de caixa liquido, calculou-se a Taxa Interna de Retorno (TIR). Os dois projetos apresentaram taxas acima da Taxa Mínima de Atratividade de 12%, indicando que, do ponto de vista da TIR, ambos os projetos são viáveis. Para o projeto da microturbina, a TIR calculada foi de 31%, enquanto que para o motogerador de 125%. Diante disso, entende-se que para qualquer taxa acima de 31% ou 125% ambos os projetos seriam rejeitados, pois o VPL seria negativo.

Importante ressaltar que apesar de possuir um CAPEX elevado, uma vantagem do ponto de vista ambiental deve ser destacada quanto às emissões da microturbina. Quando comparada com a tecnologia de grupos motogeradores de combustão interna, as microturbinas garantem uma taxa de emissão de compostos nitrogenados inferior a 9 mg/L. Esses compostos são contribuintes do efeito estufa cujo potencial poluidor equivale a 315 vezes ao do CO_2. Os motogeradores possuem emissões na ordem de 3000 mg/L (COELHO, 2006).

Outro ponto a ser discutido é que o combustível utilizado para o emprego das microturbinas deve cumprir um grau de exigência bem superior ao utilizado no motogerador. A microturbina exige que o combustível apresente propriedades especificas para que possa ser utilizado. Isso acarreta o uso de sistemas de purificação, o que não se faz necessário para a outra tecnologia, visto que além de receber o biogás *"in natura"*, o motogerador também dispensa o uso de compressão desse gás, pois emprega a aspiração.

Por ser um sistema modular, o número de microturbinas pode ser incrementado, consequentemente aumentarão os valores de CAPEX e OPEX, porém um acréscimo de kW convertidos e enviados ao sistema para consumo será maior. Importante destacar que isso dependerá da qualidade do biogás (alto ou baixo poder calorífico), pois este será um importante indicador para tal investimento.

Quando comparados os valores de *overhaul*, deve-se destacar que o do motogerador é equivalente a 1/8 do *overhaul* das microturbinas. Portanto, se for considerado o projeto motogerador, a cada 6 meses aproximadamente, o valor de R$ 20.000,00 deverá ser reinvestido para renovação do sistema. O cálculo de O&M considerou este montante reinvestido.

Desta forma, tomando como referência o *overhaul* do sistema de microturbinas (prazo de 4,56 anos), pode-se dizer que o valor total reinvestido, nesse sistema, até atingir 40.000 horas seria, aproximadamente ao equivalente a 1/3 do investido inicialmente no sistema de microturbinas.

A estação de tratamento de esgotos Palatinato possui para tratamento o sistema de reator anaeróbico de fluxo ascendente (RAFA) e opera desde o ano de 2001. A vazão média da unidade varia entre 150 L/s e 200 L/s (540 a 720 m³/h). Os resultados de demanda química de oxigênio do afluente geralmente apresentam valores entre 500 e 600 mg/L e seu efluente na faixa entre 75 e 110 mg/L. A sua eficiência média é de 80%, resultando em uma remoção equivalente a aproximadamente de 0,43 kg/m³, sendo a contribuição projetada de 50 mil habitantes.

O consumo elétrico mensal da unidade é de aproximadamente 45000 kW/h, porém inserido neste valor encontra-se um prédio administrativo, sendo as suas tarifas junto a concessionária de energia elétrica de R$ 0,12 (fora do horário de ponta) e de R$ 1,51 (dentro do horário de ponta). A média da fatura de energia elétrica varia entre R$ 13.000,00 e R$ 15.000,00 mensalmente. Admitindo o consumo mensal médio de 80 kWh para uma família composta de 4 indivíduos, tal valor equivale ao fornecimento de energia elétrica para aproximadamente 570 famílias ou 2300 pessoas.

A unidade de tratamento possui elevatória e aeração. Esta última operação equivale a aproximadamente 52% de todo o consumo de energia de uma estação, sendo o recalque do afluente responsável por apenas 3%. O consumo típico de energia para uma unidade de tratamento, considerando a inexistência de retirada de nutrientes, o que onera ainda mais o processo, é de 320 kWh para cada 1000 m³ (JORDÃO, 2010).

Se considerado o poder calorífico do biogás de 22.400 kJ/m³ e a produção de 5 a 20 Litros gás/pessoa.dia (ETE convencional), para contribuição de 200.000 pessoas, o valor teórico encontrado é de aproximadamente 4,6 x 10^6 kWh/ano. Não houve oportunidade para a medição da vazão de biogás da unidade e também para estimar a sua composição. Uma estimativa de projeto a 286 m³/dia (12 L/0,054 Kg DBO.dia). Porém, tratando de um projeto piloto, optou-se por sistemas dimensionados para vazões de 40 m³/hora aproximadamente. Ou seja, teoricamente, a unidade pode gerar até 23 kW de energia, considerando 30% de eficiência do sistema de conversão. Pode-se recorrer a um equivalente de energia onde 2.14 kWh estão para cada m³ de biogás (BANKS, 2009).

Dependendo da metodologia de cálculo da vazão do biogás e sua composição, esse volume pode variar consideravelmente, devendo elaborar um projeto piloto para os primeiros testes.

Considerando o valor médio de R$ 0,33/kWh, o volume teórico de biogás, se utilizado o motogerador ciclo Otto (uma unidade de 30 kW), gerará energia equivalente a economia de 33% do custo total pago para a concessionária de energia elétrica. Para sistemas de 50 kW, esse valor chega a R$ 12.000,00, pois a energia elétrica liquida entregue para alimentar a unidade aumenta. No caso das microturbinas, se considerado sistema de 65 kW, esse valor é equivalente a 90% da despesa com energia elétrica da unidade de tratamento, ou seja, quase a sua totalidade, podendo nestes casos, ser avaliada ainda a venda do excedente para rede externa da concessionária de energia elétrica local. Em ambos os casos, foram consideradas operações de 24 horas, durante 7 dias da semana. Atualmente, todo o biogás gerado é queimado em *flare*.

A proposta é trabalhar com capacidade instalada de 65 e 50 kW para microturbina e motogerador, respectivamente. Desta forma, a capacidade útil para cada sistema é de 56 e 47 kW, respectivamente. A conversão em energia elétrica resultaria em aproximadamente 40.880 kWh/mês e no caso dos motogeradores, esse resultado seria de 34.310 kWh/mês. Nota-se que ambas estimativas estão ligeiramente abaixo do consumo elétrico médio da unidade, incluindo o prédio administrativo. Porém, os sistemas são modulares e há possibilidade de aumentar a planta, se necessário.

A relação R$/kWh produzida da microturbina é seis vezes superior ao do motogerador, pois a relação é de R$ 2,91 para R$ 12,23, quando considerados os valores de investimento de ambas as tecnologias (CAPEX). Se considerarmos o valor de *overhaul* do motogerador de 5.000 horas, essa relação diminui, pois o valor de investimento pode variar conforme a substituição das peças ou do equipamento inteiro.

Quanto à manutenção e operação (O&M) e considerando o horizonte de 10 anos, a manutenção da microturbina é mais onerosa - em média R$ 7.485,41 contra R$ 5.060,27 dos motogeradores, acrescidos já da inflação anual de 7%. Porém, o cenário de *overhaul* do motogerador modifica o valor de O&M das tecnologias propostas, conforme a mostra a Tabela 5.9:

Tabela 5.9 - Comparação de 10 anos de Operação e manutenção (O&M) da microturbina com *overhaul* do motogerador (em R$).

Ano	Microturbina	Motogerador (Sem *overhaul*)	Motogerador (Único *overhaul*)	Motogerador (2 x *overhaul*)
1	5.416,67	1.995,83	3.662,50	5.329,17
2	5.795,83	2.135,54	3.918,88	5.702,21
3	6.201,54	2.285,03	4.193,20	6.101,36
4	6.635,65	2.444,98	4.486,72	6.528,46
5	7.100,15	2.616,13	4.800,79	6.985,45
6	7.597,16	2.799,26	5.136,85	7.474,43
7	8.128,96	2.995,21	5.496,42	7.997,64
8	8.697,98	3.204,87	5.881,17	8.557,48
9	9.321,84	3.429,21	6.292,86	9.156,50
10	9.958,32	3.669,26	6.733,36	9.797,46
Média (US$)[20]	3.140, 25	1.156,83	2.122,87	3.088,90

Fonte: Elaboração própria.

Geralmente, os fabricantes de motogeradores orientam a troca a cada 5.000 horas de operação, ou seja, um pouco mais de 6 meses. Observa-se que se consideradas duas trocas por ano, conforme recomendação, os custos diminuem e quase equiparam-se. Porém, toda decisão de troca será avaliada mediante a análise de diversos fatores, tais como rotina operacional, qualidade do gás, manuseio e cuidados com o equipamento.

Importante observar que os valores de custos para operação e manutenção são bem próximos, considerando o horizonte de 10 anos. Isto ocorre devido ao *overhaul* dos motogeradores, conforme demonstrado na Figura 5.3:

[20] Cotação Dólar Comercial: R$ 2,3837 (agosto/2013).

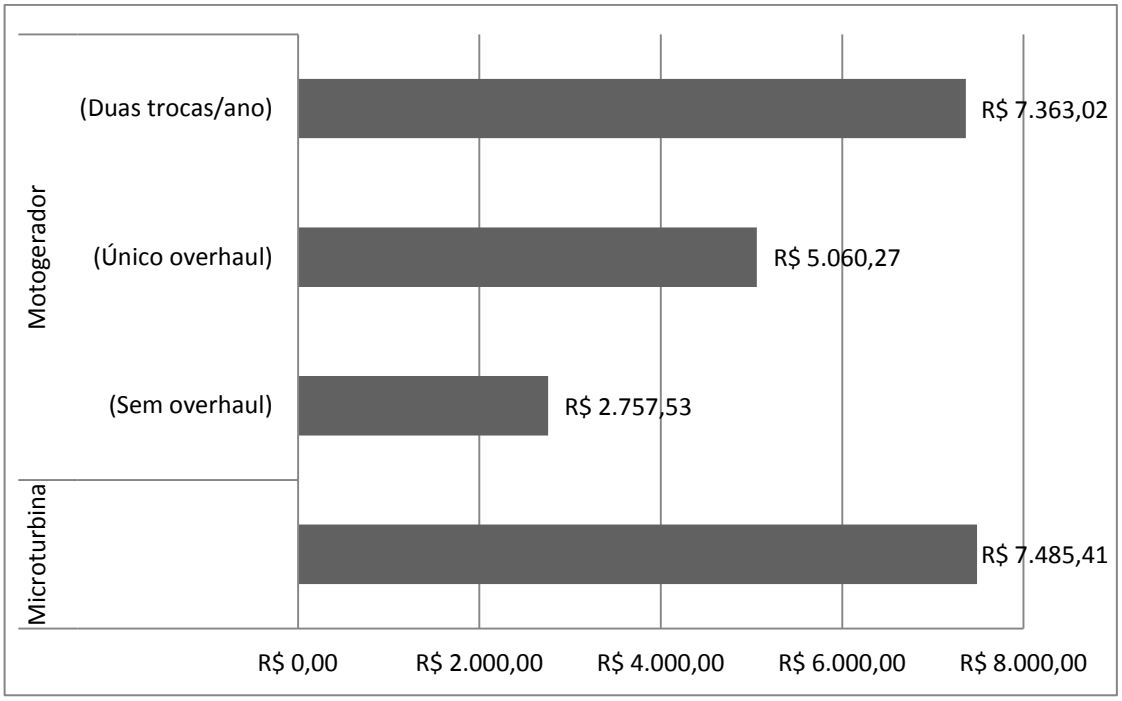

Figura 5.3 - Comparação de O&M considerando *overhaul*.
Fonte: Elaboração própria

Uma interpretação mais detalhada dos dados de consumo de energia elétrica fica prejudicada, pois não existe um medidor separado para a unidade de tratamento. Porém, ao pensar na demanda elétrica como um todo para alimentar o complexo de prédios e a estação de tratamento resta claro evidenciar que não existe um modelo de conversão adequado, pois o potencial de conversão depende de fatores ambientais (rotina operacional, composição do biogás, vazão do biogás, etc), além da decisão econômica de investir em uma determinada tecnologia.

Apesar do sistema de microturbinas possuir maior montante de investimento, trata-se de um sistema mais robusto que o motogerador e inclusive modular, sendo a sua vida média de até 10 anos. Um projeto mais elaborado, incluindo, além de atender a demanda interna, venda do excedente para a concessionária de energia local.

A Tabela 5.10 demonstra as relações entre os valores em reais do kWh em relação ao capital investido (CAPEX) e do valor presente liquido (VPL), considerando a energia elétrica líquida (mensal e em 10 anos) entregue ao sistema e a premissa de um sistema mantido com operação normal.

Tabela 5.10 – Relação entre CAPEX, VPL e kWh mensal e 10 anos.

PERÍODO	CAPEX/kWh (R$)	VPL/kWh (R$)	TECNOLOGIA
Mensal	14,74	15,40	Microturbina
10 anos	0,12	0,13	
Mensal	2,29	18,08	Motogerador
10 anos	0,02	0,15	

Fonte: Elaboração própria

A necessidade de elevado capital de investimento em microturbinas torna os valores de custos por kWh também elevados, quando comparados aos motogeradores. Apesar dos motogeradores não gerarem muita riqueza, considerando o fluxo de caixa descontado e custo de capital, o seu investimento é baixo em relação ao projeto de microturbinas. Assim, um equilíbrio é gerado entre as relações de R$/kWh das duas tecnologias comparadas, pois o Valor presente líquido de ambas, no período considerado, é bem próximo.

CAPÍTULO 6

Considerações Finais

Cada vez mais aumenta a necessidade nas estações de tratamento de esgoto da execução de práticas e metodologias inovadoras que façam com que as operações de tratamento sejam mais eficientes e que o efluente final esteja conforme a legislação de descarte. Além disso, uma gestão sustentável por parte das organizações passou a ser exigida pela sociedade.

Nesta linha, as empresas que possuírem uma gestão socialmente sustentável terão condições de satisfazer as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades.

Pode-se dizer que diferentes impactos econômicos são causados conforme a tecnologia apresentada neste trabalho. Além de buscar a sustentabilidade econômica, o excedente ainda pode ser vendido para a rede local, caso exista interesse da operadora local, cuja prática já está normalizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A permissão de venda de energia proveniente de pequenos geradores instalados nas próprias unidades consumidoras é regulamentada através da Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012. A energia que não for utilizada pelo consumidor poderá ser transferida para a rede distribuidora local. Essa troca gera um crédito que poderá ser utilizado para reduzir o valor das despesas de eletricidade nos meses seguintes.

Das tecnologias aqui comparadas, sob um prisma econômico, indicou-se a implementação da planta de motogeradores. Apesar da desvantagem da poluição, causada pelas suas elevadas emissões atmosféricas, esta tecnologia apresentou retorno de capital menor que um ano e baixo investimento, quando relacionada à microturbina. O emprego de microturbinas, apesar de ser um sistema mais robusto, exige um maior investimento que, por ser um projeto piloto, movimentará considerável soma de capital da empresa e o retorno se dará em aproximadamente 5 anos. Apesar dos fabricantes dos motogeradores, segundo dados de plantas já em funcionamento, alegarem que a vida útil desses sistemas ou sua substituição

completa apresenta-se acima dos valores teóricos, a análise deste *overhaul* é crítica para esse tipo de investimento.

As análises demonstraram que considerando o *overhaul* do motogerador, os custos de manutenção e operação quase se equivalem com os custos de operação das microturbinas. Se forem consideradas até duas trocas por ano, conforme referência do próprio fabricante, os custos para este sistema praticamente se igualam. Importante observar ainda que, em 10 anos, a geração de riquezas, considerando o valor presente líquido como indicador, pode ser considerada aproximada para as duas tecnologias comparadas, o que de certa forma, equilibra as relações entre receita gerada e economia de energia.

Como visto, não basta apenas considerar os valores demonstrados em ambos os fluxos de caixa e o seu retorno em menor tempo possível. Estes podem induzir a um erro estratégico da empresa, mesmo que evidenciados os lucros para cada tecnologia. Apesar da existência do retorno do capital investido, o investidor deve ter conhecimento se o projeto está ou não alinhado com as políticas da empresa e com os planos de negócios.

CAPÍTULO 7

Sugestões para trabalhos futuros

Recomenda-se o estudo de novos cenários tais como secagem de lodo (exigirá uma área para esse fim, hoje não existe a disponibilidade desta área), aquecimento de água para os chuveiros nos vestiários, entre outros e a análise de novas tecnologias disponíveis no mercado, além dos motogeradores e turbinas. Para isso é necessário conhecer a composição do biogás e o seu teor de metano, o que pode ser feito por meio de um plano de amostragem eficiente empregando cromatografia gasosa.

As metodologias aplicadas para o cálculo produzem estimativas exageradas; seria importante avaliar a real remoção de carga orgânica na unidade de tratamento, pois trata-se de uma premissa indispensável para os cálculos. Para isso deve-se determinar o teor de metano e o poder calorífico do gás.

Além da potência elétrica, outras possibilidades podem ser exploradas, como por exemplo, utilizar a potência térmica da planta para secagem de lodo, outro subproduto do tratamento secundário e que gera custos efetuar o descarte correto.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA – **Key World Energy Statistics** - 2010

ARNAL, J.M.; GARCÍA, B.; VERDÚ, G.; LORA, J. - **Ultrafiltration as an alternative membrane technology to obtain safe drinking water from surface water: 10 years of experience on the scope of the AQUAPOT project.** Desalination, 248 (3), p. 34-41 - 2009

ARNOLD, M., KAJOLINNA, T. - **Development of on-line measurement techniques for siloxanes and other trace compounds in biogas** - Waste Management 30, p. 1011–1017 - 2010

BANKS, C. – **Optimising anaerobic digestion** – University of Southampton - 2009

BARBOSA, A.; PINTO, B. F. M.; OLIVEIRA, R. – **Aplicação de métodos para análise de investimentos em um projeto no setor elétrico** – Revista Acadêmica Digital do Grupo Polis Educacional Intellectus – Ano 4, n° 5, Jul/Dez - 2008

BÖRJESSON, P., BERGLUND, M. - **Environmental systems analysis of biogas systems - Part I: Fuel-cycle emissions** - Biomass and Bioenergy 30, p. 469–485 - 2006

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - **Atlas do Saneamento** Disponível na internet via http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/publicacao.html - 2011

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – **Relatórios Dinâmicos – Indicadores Municipais – Acompanhamento Municipal dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio** – IBGE – 2010

BRASIL. Ministério das Cidades – **Plano Nacional de Saneamento Básico** – 2011

BRASIL. Ministério das Cidades - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – **Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos** — 2009

BRASIL. Ministério da Saúde – **Portaria 2914** – 2011

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - **Informação Programa de Incentivo às Fontes Alternativas - PROINFA 2006** - Disponível na internet via www.mme.gov.br – Acessado em 13 de novembro de 2011

BRASIL. Ministério do Planejamento - Ministério das Cidades - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) — Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – **Orçamento e Gestão –** 2008

CHEN, Y., J. CHENG, J., S. CREAMER, K. - **Inhibition of anaerobic digestion process: A review** - Bioresource Technology 99, p. 4044-4064 - 2008

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

COELHO, S. T., VELÁSQUEZ, S. M. S. G., MARTINS, O. S., ABREU, F. C. DE – **A conversão da fonte renovável biogás em energia** – V CBPE – Congresso Brasileiro de Planejamento Energético – Políticas Públicas para a energia: Desafios para o próximo quadriênio – Brasília – DF – 2006

COELHO, S. T., VELAZQUEZ, S. M. S. G., MARTINS, O. S., ABREU**,** F. C. DE - **Sewer biogás conversion into electricity** – Trabalho apresentado no XI Congresso Brasileiro de energia (CBE) – 16 a 19 de agosto de 2006 – Rio de Janeiro – 2006

COELHO, S. T., VELÁSQUEZ, S. M. S. G., MARTINS, O. S., ABREU, F. C. DE – **A conversão da fonte renovável biogás em energia** – V CBPE – Congresso

Brasileiro de Planejamento Energético – Políticas Públicas para a energia: Desafios para o próximo quadriênio – Brasília – DF – 2006

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – **Matriz Energética: Cenários, Oportunidades e Desafios** – Brasil - 2007

COSOLI, P. *et al*. - **Hydrogen sulphide removal from biogas by zeolite adsorption - Part I. GCMC molecular simulations** - Chemical Engineering Journal 145, p. 86–92 - 2008

COSTA, D. F. DA - **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto** – Dissertação de mestrado -– Universidade de São Paulo – 2006

CURY, M. V. Q. - FGV Management – MBA em Gestão Empresarial – **Finanças Corporativas** – 2007

DI BERNARDO, L., PATRICIA SABOGAL PAZ, L. - **Seleção de Tecnologias de Tratamento de água** – Volume 1 – Editora LDiBe – 2008

EDER, C. F.; MENESES, G.; FITERMAN, L.; TINOCO, M. A. C. – **Avaliação dos métodos da taxa interna de retorno modificada: uma aplicação prática** – Artigo – UFRGS – 2004

EL-FADEL, M., MASSOUD, M. - **Methane emissions from wastewater management** – Environmental Pollution 114, p. 177-185 – 2001

FOSTER, G.; RAHMSTORF, S. - **Global temperature evolution 1979-2000** – Environmental Research Letters – 6 - 2011

FILHO, C. E. G. C., MARTINS, E., MARQUES, M., HOGLAND, W. - 26° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - VI – 089 - **Avaliação do modelo de geração do gás metano em aterros sanitários da USEPA: Estudo de caso do**

aterro de Moskogen – Kalmar – Suécia - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – 2008

GASPAR, R. M. B. L. - **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo/PR** - Dissertação de Mestrado – UFSC – 2003

GOMES, H. P., - **Sistemas de Abastecimento de Água – Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias** – Editora Universitária – UFPB – 3ª edição - 2009

GRANATO, E. F. - **Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça** – Dissertação de Mestrado – UNESP – Abril 2003

HAMMADA, M., BADARNEHB, D., TAHBOUBA, K. - **Evaluating variable organic waste to produce methane** - Energy Conversion & Management 40, p. 1463-1475 - 1999

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC - **Guidelines for Greenhouse Gas inventory: reference Manual Revised – Chapter 6 – Waste** - 1996

INTERNATIONAL ASSOCIATION ON WATER QUALITY - IAWQ – **Actived sludge model** – n.2 – Scientific and Technical Reports – 1995

INTERNATIONAL COUNCIL FOR LOCAL ENVIRONMENTAL INITIATIVES - ICLEI – Disponível na internet via www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf - Acessado em 12 de novembro de 2011

JUNIOR, A. T. DE F. - **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto** – Dissertação UNESP – 2008

JORDÃO; E. P. – Disponível em http\www.valor.com.br/sites/default/files/8eduardo_pacheco_jordao_sao_paulo_0.pdf - Acessado em 04 de dezembro de 2010

KLING, A. S. M. - 23° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – VI-128 - **Avaliação da degradação ambiental por ações antrópicas na Bacia Hidrográfica do rio Piabanha** - ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – 2005

KLING; A. S. M. - **Aplicação do Método Battelle na avaliação do impacto ambiental na Bacia hidrográfica do rio Piabanha** – Fundação Oswaldo Cruz - 2005

KYMÄLÄINEN, K. M., LÄHDE, M., ARNOLD B, J.M. KUROLA, M. ROMANTSCHUK, H. KAUTOLA - **Biogasification of biowaste and sewage sludge – Measurement of biogás quality** - Journal of Environmental Management 95 - 122-127 - 2012

LASTELLA, G., TESTA, C., CORNACCHIA, G., NOTORNICOLA, M., VOLTASIO, F., SHARMA, V. K. - **Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification** – Energy Conservation and Management 43, p. 63-75 - 2002

LEITE, L. E. H. B. DA C; MAHLER, C. F., FILHO, L. F. B. - 23° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - III – 204 - **Avaliação do potencial de receitas derivadas do biogás do aterro -** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – 2005

LERMONTOV, A., YOKOYAMA, L., CALADO, V. M. A. - **Monitoramento da qualidade das águas do rio Palatinato – Petrópolis/RJ** – UFRJ/EQ – Dissertação (MSc.) – 2003

LERMONTOV, A. - 23° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – II-307 – **Monitoramento da qualidade das águas do rio Palatinato –**

Petrópolis/RJ - ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – 2005

LERMONTOV, A., SALLES, M. - 25° Congresso ABES – II-459 **- Coleta total de efluentes dentro de canal com tomadas de tempo seco e metodologia não-destrutiva em área de preservação do Patrimônio Histórico Nacional -** ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – 2007

LEW, B., LUSTIG I., BELIAVSKI, M., TARRE, S., GREEN, M. - **An integrated UASB-sludge digester system for raw domestic wastewater treatment in temperate climates** - Bioresource Technology - 2011

LOBATO, L. C. DA S., CHERNICHARO, C. A. DE L., PUJATTI, F. J. P., MARTINS, O. M., MELO, G. C. B. DE - 26° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – XI - 025 – **Utilização de biogás de reatores anaeróbios para cogeração e uso de eletricidade e calor em estações de tratamento de esgoto doméstico** - ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – 2008

MARQUEZAN, L. H. F.; **Análise de Investimentos** – Revista Eletrônica de Contabilidade – Vol. III – n. 1 – Jan-Jun – 2006

MEADOWS, D; RANDERS, J.; MEADOWS, D. - **Limits to Growth (The 30-Year update)** – Chelsea Green/Earthscan/Diamond/Kossoth - 2004

NEVES, V. L. V. – **Construção de biodigestor para produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino** – Faculdade de Tecnologia de Araçatuba – Curso de Tecnologias de Biocombustíveis – Araçatuba - 2010

OLIVEIRA, R. D. E - **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono** – Trabalho de conclusão de curso de Graduação — EESC/USP – 2009

OLIVEIRA, W. R. DE, DOMINGUES, E. G. – **Energia elétrica e Créditos de carbono: uma proposta de aproveitamento energético do biogás gerado em estações de tratamento de esgoto: estudo de caso** – UNOPAR – Cient. Exatas Tecnol., Londrina – v.10, n. 1, p. 61-67, Nov. 2011

OLIVEIRA, A. C. DE, VEIGA, M. M., SILVA, D. M. - 23° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - VII – 047 - **Áreas potencialmente contaminadas no município de Petrópolis – RJ e seus possíveis reúsos** - ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – 2005

OLIVEIRA, W. R. DE, DOMINGUES, E. G.– **Energia elétrica e Créditos de carbono: uma proposta de aproveitamento energético do biogás gerado em estações de tratamento de esgoto: estudo de caso** – UNOPAR – Cient. Exatas Tecnol., Londrina – v.10, n. 1, p. 61-67, Nov. 2011

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - **Relatório IPCC — Novos Cenários Climáticos** – Paris 2007

PADOVEZE, C. L; OLIVEIRA, J. C. DE - **Avaliação de projetos utilizando as métricas de gestão baseada em valor (VBM - Value Basead Management)** - Business review, Porto Alegre: Unifin, n. 1, p. 97-109, 1 sem - 2006

PECORA, V., VELÁSQUEZ, S. M. S. G., COELHO, S. T. - Centro Nacional de Referencia em Biomassa (CENBIO) - **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: estudo de caso em São Paulo -** Trabalho publicado no evento: XIII Congresso Brasileiro de Energia - XIII CBE, 09 a 11 de novembro de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil - 2010

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V. DE; COELHO, S. T.; VELÁSQUEZ, S. M. S. G. - **Biogás e o Mercado de Créditos de Carbono** - CENBIO – 2008

POSTEL, S.; VICKERS, A. - **Estado do Mundo – Capitulo 3 – Incrementando a Produtividade Hídrica** – 2004

PROACQUA - **Memorial de Cálculo** – Unidade ETE Palatinato - 2001

RASI, S., VEIJANEN, A., RINTALA, J. - **Trace compounds of biogas from different biogas production plants** - Energy 32, p. 1375–1380 - 2007

REICHERT, G. A. - 23° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental III – 242 - **Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão -** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – 2005

SALOMON, K. R., LORA, E. E. S. - **Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil** - Biomass and Bioenergy 33, p. 1101-1107 - 2009

SANTANA, N.; COHIM, E. - 26° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – II-388 – **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás produzido em uma estação de tratamento de esgotos de Madre Deus – BA** - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – 2010

SANTOS, J. H. T. - **Avaliação de um sistema de aquecimento do substrato na biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos** – Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa – 2004

SCHATTAUER, A., ABDOUN, E., WEILAND, P., PLÖCHL, M., HEIERMANN, M. - **Abundance of trace elements in demonstration biogas plants** – Biosystems Engineering 108, p. 57-65 - 2011

SEGHEZZO, L., ZEEMAN G., B. VAN LIEL, J., H. V. M. HAMELERS, LETTINGA, G. - **A Rewiew: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors** - Bioresource Technology 65, p. 175-190 - 1998

SOARES, A. F. - **Cobertura final de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos avaliada sob o enfoque da oxidação microbiológica do metano** - Universidade do Vale do Rio dos Sinos – 2011

SUZUKI, A. B. P., MARIA FERNANDES, D., FARIA, R. A. P., VIDAL, T. C. M. – **O uso do biogás em motores de combustão interna** – Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias – Guarapuava – PR, v.4, n.1, p. 221-237 – 2011

TEIXEIRA, C. E., TORVES, J. C., FINOTTI, A. R., FEDRIZZI, F., F A. M., TEIXEIRA, P. F. - **Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil** – Engenharia Sanitária Ambiental – V.14 n.1 – 99 -108 - Jan/Mar - 2009

TEIXEIRA, C. P. DE A. B.; W. DE F. - **Caderno Temático – volume 3 - Processos Oxidativos Avançados** – UNICAMP - Agosto – 2004

UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF) - **Global Water Supply and Sanitation Assessment Report** – 2000

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA - **Air emissions from municipal solid waste landfills – background information for proposed standards and guidelines** - 1991

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA - **Global Mitigation of NON-CO2 Greenhouse Gases – Section III – Waste** - 2006

URTADO, E. S.; SANTO, V. DA S.; QUINTAIROS, P. C. R.; OLIVEIRA, E. A. DE A. Q. – **Aplicação do método de Valor Presente Líquido (VPL) na análise da viabilidade econômica de projetos na Indústria de cerâmica: um estudo de caso** – XIII Encontro Latino de Iniciação Cientifica - 2010

VAIRAVAMOORTHY, K., D. GORANTIWAR, S., PATHIRANA, A. - **Managing urban water supplies in developing countries – Climate change and water scarcity scenarios** - Physics and Chemistry of the Earth 33, p. 330–339 - 2008

VON SPERLING, M. - **Princípios do Tratamento Biológico de águas residuárias** - Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos – Volume 1 – 3ª edição - 2005

WORLD HEALTH ORGANISATION – **Guidelines for drinking-water quality - Volume 1 – Recommendations (WHO)** - Geneva. 2 ed. 188p – 1993

ZANETTI, A. L. - **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil** – Dissertação Mestrado – COPPE/UFRJ – Dezembro de 2009