

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia - PIPGE

(EP/FEA/IEE/IF)

Felipe Palma Lima

**ENERGIA NO TRATAMENTO DE ESGOTO:
ANÁLISE TECNOLÓGICA E INSTITUCIONAL PARA
CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E USO DO BIOGÁS**

SÃO PAULO
2005

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

FICHA CATALOGRÁFICA

Lima, Felipe Palma.

Energia no tratamento de esgoto : análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás/
Felipe Palma Lima ; orientador Célio Bermann.
São Paulo, 2005. 139p. : il.; 30cm.

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

1. Biogás 2. Eficiência energética 3. Conservação de energia – aspectos ambientais 4. Recursos energéticos
I. Título.

Felipe Palma Lima

**ENERGIA NO TRATAMENTO DE ESGOTO:
ANÁLISE TECNOLÓGICA E INSTITUCIONAL PARA
CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E USO DO BIOGÁS.**

Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Energia.

Orientador: Prof. Dr. Célio Bermann

SÃO PAULO
2005

Esta versão difere da dissertação depositada e aprovada na defesa, à qual foram incorporadas modificações sugeridas pela comissão examinadora, devidamente verificadas e aprovadas pelo orientador.

Prof. Dr. Célio Bermann

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Célio Bermann – Orientador (PIPGE-USP)
Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (UFMG)
Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni (IEE-USP)

Dedico este trabalho aos meus pais Odilon e Elisa e aos meus irmãos Oscar, Izabela e Bernardo.

Agradecimento

Ao imenso apoio dos meus pais, meus irmãos e minha querida irmã. Dedico mais este passo ao exemplo que vocês me dão. Sem o apoio incondicional de vocês esta conquista seria impossível.

Ao Dr. Silvio Lisboa e ao Dr. Fernando Roquette Reis, minha eterna gratidão pela sabedoria, amizade e atenção, que me ajudam a vencer meus desafios.

Ao meu Orientador Prof. Célio Bermann, pela sabedoria e amizade, além do incentivo e apoio, quando necessários. Um exemplo de dedicação e seriedade profissional.

Ao IEE, pela oportunidade do curso de Mestrado. Usufruir desta excelente instituição contribuiu definitivamente como incentivo ao trabalho e a dedicação.

À CAPES, pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado, essencial para este trabalho.

Ao COSEAS, por todas as facilidades e apoio oferecidos, que contribuíram para o melhor aproveitamento do curso e da universidade.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Energia, pelo acolhimento no programa, pelo conhecimento e pelo exemplo de dedicação ao Ensino e Pesquisa.

Aos funcionários do IEE, pela amizade, simpatia e atenção.

Aos colegas do PIPGE, pela amizade, contribuições à reflexão e ao incentivo.

A todos e todas que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho.

Ilustração é a saída do homem de sua culpada
menoridade. *Sapere aude!* Tem a coragem de servir-te
de tua própria razão é, pois, o lema da Ilustração.

Immanuel Kant

RESUMO

LIMA, F. P. **Energia no tratamento de esgotos: Análise tecnológica e institucional para a conservação de energia e o uso do biogás**. 2005. 139 p. Dissertação de mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

As tecnologias de remoção da matéria orgânica presente nos esgotos domésticos baseiam-se em dois princípios: o processo biológico aeróbio e o processo biológico anaeróbio. A comparação energética entre os dois é favorável ao processo anaeróbio. Além de não necessitar de aeração, o processo anaeróbio produz maior quantidade de metano.

Os estudos de caso contribuem para confirmar a expectativa da melhor eficiência dos processos anaeróbios em comparação aos aeróbios. Estes casos estudados também mostram que outros usos finais podem contribuir significativamente para incrementar o consumo elétrico total da ETE. Além disto, o uso do biogás para geração de eletricidade pode tornar alguns sistemas auto-sustentáveis energeticamente.

A análise das ações institucionais mostra que as políticas voltadas para a universalização do saneamento apresentam alguns pontos que favorecem as tecnologias de tratamento de esgotos de maior eficiência energética. Por outro lado, as políticas voltadas para a eficiência energética no saneamento e o uso de fontes renováveis de energia ainda não apresentaram resultados favoráveis às ETEs.

Palavras-chave: Tratamento de esgoto, aeróbio, anaeróbio, ETEs, política, energia renovável, saneamento, eficiência energética, conservação de energia

ABSTRACT

LIMA, F. P. **Energy in wastewater treatment: technological and institutional analysis for energy conservation and biogas use**. 2005. 139 f. Work. Program of Post-Graduation in Energy, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

The technologies used to remove organic matter from domestic wastewaters are based in two principles: the aerobic biological process and the anaerobic biological process. The comparison of both processes favors the anaerobic one. Besides the lack of energy requirement for aeration, the anaerobic biological process produces a larger amount of methane.

The case studies contribute to confirm the expectations of better efficiency of the anaerobic biological process in comparison to the aerobic one. The study cases also demonstrate that other energy uses can play a big difference in the total electrical consumption of each wastewater treatment system.

Some policies towards the increase in the sanitary systems were studied. The analysis of these governmental actions demonstrated some incentive to better energy efficiency in wastewater treatment systems. In the other hand, specific programs toward energy efficiency and use of renewable energy sources have not contributed to the wastewater treatment systems.

Keywords: Wastewater treatment, aerobic, anaerobic, policy, renewable source of energy, sanitation, energy efficiency, energy conservation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Seqüência de predominância relativa de microrganismos no processo aeróbio	44
Figura 2.2: Esquema do ecossistema anaeróbio	47
Figura 2.3: Sistema aeróbio de lodos ativados convencional	52
Figura 2.4: Sistema anaeróbio tipo UASB	53
Figura 2.5: Funcionamento de um reator UASB	60
Figura 2.6: Balanço energético do processo aeróbio	73
Figura 2.7: Balanço energético do processo anaeróbio	73
Figura 2.8: Poder calorífico inferior por concentração de metano	75
Figura 3.1: Demanda de carga na ETE Barueri	85
Figura 3.2: Vazão de esgoto na ETE Barueri	85
Figura 3.3: Características do biogás da ETE Barueri	88
Figura 3.4: Parâmetro de eficiência energética das ETEs estudadas	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Evolução da cobertura dos serviços de esgotos no Brasil - %	15
Tabela 2.1: Presença de sólidos nos esgotos domésticos brutos	26
Tabela 2.2: Presença de matéria orgânica nos esgotos domésticos brutos	29
Tabela 2.3: Valores de DQO por unidade de massa de alguns compostos orgânicos	30
Tabela 2.4: Presença de nitrogênio nos esgotos domésticos brutos	30
Tabela 2.5: Presença de fósforo nos esgotos domésticos brutos	31
Tabela 2.6: Presença de microrganismos nos esgotos domésticos brutos	31
Tabela 2.7: Classificação dos organismos quimiotróficos baseada nas fontes de energia e carbono.	33
Tabela 2.8: Aceptores de elétrons nos processos biológicos de tratamento de esgoto	36
Tabela 2.9: Valores energéticos de alguns compostos orgânicos.	37
Tabela 2.10: Características do catabolismo oxidativo e fermentativo	40
Tabela 2.11: Classificação das bactérias quanto à faixa de temperatura	42
Tabela 2.12: Sistemas de baixa carga com eficiências de remoção de DQO e SS, e custos	51
Tabela 2.13: Tipos de aeradores mecânicos	52
Tabela 2.14: Tipos de aeradores por ar difuso	53
Tabela 2.15: Principais características dos sistemas de lodos ativados e UASB – lodos ativados no tratamento de esgotos domésticos	54
Tabela 2.16: Sistemas de alta-taxa, eficiências, requisitos de energia e custos.	55
Tabela 2.17: Parâmetros de sistemas de tratamento de esgoto com crescimento aderido: eficiência, volume de lodo e energia	58
Tabela 2.18: Parâmetros de sistemas de tratamento de esgoto com crescimento disperso e recirculação: eficiência, volume de lodo e energia	62
Tabela 2.19: Relação de densidade de potência com a concentração de sólidos que podem ser mantidas em suspensão	66
Tabela 2.20: Energia livre em compostos orgânicos	67
Tabela 2.21: Comparação entre processos aeróbios e anaeróbios	72
Tabela 2.22: Poder calorífico inferior por concentração de metano	75
Tabela 2.23: Solubilidade de alguns componentes do Biogás	76
Tabela 2.24: Consumo de biogás para geração de energia elétrica	80
Tabela 3.1: ETEs na região metropolitana de São Paulo	84
Tabela 3.2: Processos unitários da ETE Barueri	86
Tabela 3.3: Concentração de Metais Pesados no Lodo da ETE Barueri	87
Tabela 3.4: Características do biogás da ETE Barueri	87
Tabela 3.5: Dados de remoção de DQO e consumo elétrico na ETE Santana	91
Tabela 3.6: ETEs em operação	95
Tabela 3.7: ETEs em implantação	96
Tabela 3.8: Parâmetro de eficiência energética das ETEs estudadas	97
Tabela 3.9: Consumo de eletricidade por DQO removida em sistemas de tratamento	98
Tabela 4.1: Valores Econômicos do PROINFA	117

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO – Demanda Química de Oxigênio
DQO_{CH4} - Demanda Química de Oxigênio do Metano
ETE – Estação de Tratamento de Esgotos
UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket
SS – Sólidos em Suspensão
SST – Sólidos em Suspensão Totais
SSV – Sólidos em Suspensão Voláteis
SSF – Sólidos em Suspensão Fixos
CH₄ – Metano
CO₂ – Gás Carbônico
PCS – Poder Calorífico Superior
PCI – Poder Calorífico Inferior
PRODES - Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas
ANA – Agência Nacional de Águas
PMSS – Programa de Modernização do Setor de Saneamento
PROINFA - Programa de incentivo a fontes alternativas de energia
IPI – Imposto sobre Produção Industrial
MME - Ministério de Minas e Energia
PPA – Plano Plurianual
PROCEL SANEAR – Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental
ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
OGU – Orçamento Geral da União
FAT – Fundo de Amparo ao Trabalhador
GEEs – Gases de Efeito Estufa
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
CEPAL – Comissão Econômica para a América Latina
BNDES – Banco de Desenvolvimento Econômico e Social
PIA – Produtor Independente Autônomo
PIE – Produtor Independente de Energia
ONU - Organização das Nações Unidas
EGTT – Grupo de Especialistas em Transferência de Tecnologia
SBSTA – Conselho de Ciência e Tecnologia da COP

COP – Conferência das Partes do Protocolo de Quioto

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RELAÇÃO DE ABREVIATURAS.....	x
Capítulo I – Introdução.....	13
1- Apresentação.....	13
2- Objetivo.....	13
3- Justificativa.....	14
4- Metodologia.....	18
Capítulo II - Princípios biológicos e energéticos do tratamento de efluentes.....	24
1- Composição e características dos efluentes líquidos.....	25
1.1 – Sólidos.....	25
1.2 - Matéria Orgânica.....	27
1.2.1 - DBO.....	27
1.2.2 - DQO.....	28
1.3 – Outras características dos Efluentes Líquidos.....	30
2- Processos biológicos de tratamento de efluentes líquidos.....	31
2.1 - Metabolismo aeróbio e anaeróbio.....	32
2.1.1 – Catabolismo oxidativo.....	36
2.1.2 – Catabolismo fermentativo.....	38
2.1.3 – Anabolismo aeróbio e anaeróbio.....	40
3- Tipos de ecossistemas microbiológicos.....	42
3.1 - ecossistema aeróbio.....	43
3.2 - ecossistema anaeróbio.....	44
4- Características dos reatores biológicos.....	47
4.1 - Características hidráulicas dos reatores biológicos.....	48
4.2 – Características quantidade de carga orgânica absorvida.....	48
4.2.1 - Sistemas de baixas cargas orgânicas.....	48
4.2.2 - Sistemas de alta-taxa.....	51
4.3 – Mecanismos de retenção de biomassa em reatores biológicos.....	55
4.3.1 – Sistemas com crescimento aderido.....	56
4.3.2 – Sistemas com crescimento disperso e recirculação de lodo.....	58
5- Consumo de energia nos sistemas de tratamento.....	62
6- Consumo e geração de energia nos processos biológicos.....	63
6.1 – Energia no processo aeróbio.....	64
6.1.1- Consumo de energia no reator aeróbio.....	64
6.1.2- Consumo de energia da matéria orgânica.....	66
6.1.3- Produção de lodo e biogás no processo aeróbio.....	67
6.2 – Energia no processo anaeróbio.....	69
6.2.1- Consumo de energia no reator anaeróbio.....	69
6.2.2- Consumo de energia da matéria orgânica.....	69
6.2.3- Produção de lodo e biogás no processo anaeróbio.....	70
6.3 - Balanço energético dos processos biológicos.....	72

7- Propriedades do Lodo.....	74
8- Propriedades do biogás.....	74
9- Usos para o biogás.....	78
9.1 – Uso do biogás para gerar eletricidade.....	79
9.2 – Uso do biogás nas ETEs.....	82
 Capítulo III – Estudos de Caso.....	 83
1- ETEs em operação.....	84
1.1 - ETE Barueri (Barueri/RMSP).....	84
1.2 - ETE Arrudas (Belo Horizonte/MG).....	89
1.3 - ETE Santana (Varginha/MG).....	90
1.4 - ETE Ipatinga (Ipatinga/MG).....	92
2- ETEs em implantação.....	92
2.1 - ETE Piçarrão (Campinas/SP).....	92
2.2 - ETE Onça (Belo Horizonte/MG).....	93
3- Avaliação das ETEs estudadas.....	94
 Capítulo IV – Avaliação das ações institucionais.....	 99
1- Políticas para o saneamento.....	99
1.1 – Objetivo das políticas em saneamento.....	101
1.2 - Dificuldades encontradas para universalizar o serviço de saneamento.....	101
1.3 - Estratégias para universalizar os serviços de saneamento.....	102
1.4 - Programas de Saneamento.....	103
1.4.1 - Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR).....	103
1.4.2 - Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES).....	104
1.4.3 - Programa Saneamento Ambiental Urbano.....	105
1.4.4 - Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS).....	106
2 – Políticas para energia renovável: Quais as chances do biogás?.....	106
2.1 - Potencial das fontes de energia renovável.....	107
2.2 - Vantagens da energia de fontes renováveis.....	108
2.3 - Dificuldades encontradas para inserir as fontes renováveis.....	110
2.4 - Estratégias para inserção das fontes renováveis de energia.....	111
2.5 – Programa de Incentivo de Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA).....	116
3 - Desenvolvimento sustentável?.....	119
 Capítulo V – Conclusões e recomendações.....	 124
5.1 - Conclusões.....	124
5.2 - Recomendações.....	130
 Referência Bibliográfica.....	 132
 Anexo I - Características típicas dos principais sistemas de tratamento de esgotos.....	 136
Anexo II – Eficiência energética de sistemas de tratamento de esgotos.....	137
Anexo III – Resultado do Programa de Recuperação de Bacias Hidrográficas (PRODES).....	138
Anexo IV – Resultados do PROINFA – BIOMASSA.....	139

Capítulo I - Introdução

1- Apresentação

Este estudo pretende analisar as questões energéticas relacionadas ao uso dos processos biológicos para o tratamento de efluentes. Os processos biológicos compõem os sistemas de tratamento de esgotos. Nas estações de tratamento de esgoto (ETE) consome-se energia elétrica e energia química proveniente da matéria orgânica. Nestas estações produz-se energia química através dos processos biológicos, na forma de biogás. A quantidade de energia utilizada e gerada no sistema de tratamento depende do tipo de processo biológico adotado.

A ampliação do tratamento de esgotos a todas as camadas da população é hoje uma necessidade urgente da nossa sociedade. A falta de saneamento impacta negativamente a área social (doenças) e ambiental (poluição e desequilíbrio ambiental). A análise energética dessas tecnologias pode contribuir para o planejamento da expansão do sistema de saneamento no país. Neste caso, no planejamento, deve-se buscar a adoção de sistemas mais eficientes energeticamente.

Além disto, o biogás produzido por sistemas de tratamento representa uma fonte de energia limpa e renovável. Entretanto, trata-se ainda de um recurso natural desperdiçado, pois sua utilização hoje no setor de saneamento é bastante reduzida.

2- Objetivo

Esta dissertação de Mestrado pretende identificar e avaliar os processos de tratamento de efluentes líquidos em relação a sua eficiência energética e à possibilidade de recuperação da energia química da matéria orgânica. Em outras palavras, identificar aqueles processos que consomem menos eletricidade com maior produção de biogás.

Através de estudos de caso pretende-se avaliar o desempenho energético de sistemas de tratamento de esgotos. Os estudos de caso incluem processos biológicos aeróbios e anaeróbios. O resultado de eficiência energética destes exemplos pode ser usado como base para comparação entre os sistemas de tratamento. Além disto, pode-se checar os resultados práticos com os indicados pela teoria, para verificar se estão dentro destes padrões.

Outro objetivo deste trabalho é identificar, analisar e avaliar as ações institucionais voltadas para o aumento do serviço de tratamento de esgoto, e se essas ações estão viabilizando sistemas de tratamento mais eficientes energeticamente. Esta análise será feita com base nos programas e políticas do governo federal nas áreas de saneamento e energia. A avaliação das ações institucionais pretende verificar os objetivos e resultados (quando disponíveis) destes programas, as barreiras para atingir seus objetivos, as dificuldades de articulação e as estratégias de implementação intersetorial.

3- Justificativa

O saneamento básico é essencial para promover a cidadania, a saúde e a vida. A oferta de saneamento reduz a poluição do ambiente e cria melhores condições para o desenvolvimento da infância e da sociedade. Melhorar o serviço de saneamento é melhorar a saúde da população.

Porém, os índices de atendimento no país são baixos. Os desafios para atingir a universalização do atendimento básico em saneamento são significativos. Uma grande parcela da população não tem acesso à água tratada, rede de esgoto ou coleta de lixo doméstico. A industrialização acelerada e a urbanização desordenada geraram uma evidente ausência de tratamento adequado dos resíduos urbanos. Nos últimos 30 anos houve um grande aumento na demanda por saneamento, mas apenas uma pequena parte foi atendida. Em 2000, 39 milhões de pessoas não tinham acesso à rede de esgoto ou fossa séptica. A ausência de saneamento é a principal causa de degradação ambiental e de qualidade de vida (Abicalil, 2002).

Nos anos 70, 80 e 90 a expansão do abastecimento de água foi maior que o crescimento populacional. Entre 1970 e 2000, a oferta de serviço de abastecimento para domicílios urbanos passou de 60,5% para 89,8%. Entretanto, o aumento do acesso à rede de esgotos no mesmo período foi menor que o crescimento da população. Entre 1970 e 2000, o número de domicílios urbanos ligados à rede de coleta de esgoto passou de 22,2% para 56,0%, (Abicalil, 2002). A tabela 1.1 mostra a evolução da cobertura dos serviços de esgotos no Brasil.

Quinze milhões de brasileiros, ou 9,9 milhões de domicílios, não têm acesso ao abastecimento de água tratada. Entre os que recebem água encanada, alguns não contam com o abastecimento diário, outros não recebem água potável de boa qualidade (Abicalil, 2002).

Tabela 1.1: Evolução da cobertura dos serviços de esgotos no Brasil - %

Indicadores	1970	1980	1990	2000
Esgotamento sanitário				
domicílios urbanos - rede de coleta	22,2	37	47,9	56
- fossa séptica	25,3	22,9	20,9	16
domicílios rurais - rede de coleta	0,45	1,4	3,7	3,3
- fossa séptica	3,2	7,2	14,4	9,6

Fonte: IBGE, Censos Demográficos 1970, 1980, 1990, 2000 (apud Abicalil, 2002).

Além do elevado déficit, a desigualdade na oferta de serviço mostra o perfil de inequidade do acesso e da distribuição do saneamento. A maior escassez do serviço se concentra na camada mais pobre da sociedade, nas periferias das grandes cidades, nos pequenos municípios, localidades e comunidades rurais, nas regiões menos desenvolvidas, no Norte e Nordeste. Proporcionalmente, o déficit na zona rural é bem maior que nas áreas urbanizadas. Entre os 10% mais ricos do país, 80,1% tinha acesso aos serviços de saneamento em 1999. Já para os 40% mais pobres, apenas 32,3% tinha acesso a estes serviços (Abicalil, 2002).

Os índices de atendimento por serviços sanitários são menores no Norte e Nordeste. Enquanto nestas regiões o déficit em redes de esgoto e fossas sépticas é superior a 60%, na região Sul é de 36% e na Sudeste, inferior a 20%. Entretanto, a cobertura destes serviços está muito ligada ao índice de urbanização e à existência de infra-estrutura pública. O índice de urbanização das duas primeiras regiões é de cerca de 70%, e nas duas últimas é de 80 e 90% respectivamente (Abicalil, 2002).

Considerando o tamanho dos municípios, pode-se analisar um grupo de municípios com menos de 5.000 domicílios e outro com mais de 100 mil domicílios. Aqueles com menos de 5.000 domicílios representam 2/3 dos municípios do país e 20% dos domicílios. Neste grupo existem 5,9 milhões de domicílios sem esgotamento sanitário, equivalente a 35% do déficit no país. O segundo grupo é formado por 45 municípios, metade da população do país. No segundo grupo são 5,3 milhões de domicílios sem esgotamento sanitário, ou seja, 32% do déficit. Além disto, o PIB do primeiro grupo de municípios é 2,3 vezes menor que do segundo. Ou seja, os habitantes dos municípios menores têm menos renda para pagar tarifa (Abicalil, 2002).

A maior incidência de algumas doenças está relacionada à deficiência ou inexistência de saneamento básico. O número de internações hospitalares devido a doenças causadas pela falta de saneamento é muito alto no país. Segundo dados do Ministério da Saúde, cerca de 700 mil internações por ano são relativas à carência de serviços de saneamento básico. Porém

estas internações se concentram nas regiões de menor cobertura de serviços de saneamento. Esta cobertura é menor nas regiões menos desenvolvidas e nos municípios mais pobres. A região Nordeste apresenta 44% das internações relativas a doenças de veiculação hídrica do país e apenas 25% dos domicílios. Por outro lado, a região mais rica do país (o Sudeste) tem 21% do total das internações e 45% dos domicílios (Abicalil, 2002).

Segundo dados do Sistema de Informações Hospitalares do SUS (SIH/SUS, 2002 apud Abicalil, 2002), entre 1995 e 1999 foram feitas 3,2 milhões de internações por doenças infecciosas intestinais. Estas doenças são: cólera, diarreia e gastroenterite de origem infecciosa presumível, febre tifóide, shigelose, intoxicação alimentar, amebíase, infecções intestinais devido a outros organismos específicos e infecções intestinais mal definidas. Ocorreram também, no mesmo período, 176 mil internações por doenças transmitidas por vetores, como a dengue, esquistossomose, malária, leptospirose e doença de chagas. Todas estas internações podem ser significativamente reduzidas com a implementação adequada dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário (Abicalil, 2002).

A poluição ambiental causada pela emissão de esgoto bruto é a principal forma de poluição dos recursos hídricos e do litoral do país. As grandes e médias cidades e regiões urbanizadas poluem de forma concentrada, aprofundando ainda mais o problema. Segundo dados do Sistema Nacional de Informação em Saneamento (SNIS, 2002 apud Abicalil, 2002) do Governo Federal, 15,2 milhões de domicílios urbanos estão conectados à rede de esgoto. Apenas metade do volume de esgoto coletado recebe algum tipo de tratamento. Os outros 50% são despejados “in natura” nos cursos d’água. Além disto, considerando que existem 37,3 milhões de domicílios urbanos e 7,1 milhões possuem fossa séptica, restam 22,6 milhões de domicílios que produzem esgoto e lançam no meio ambiente sem tratamento. O volume de esgoto produzido por domicílio é, em média, de 490 litros por dia, ou seja, 11 milhões de m³/dia de esgoto bruto lançados diretamente no ambiente (Abicalil, 2002).

De acordo com dados do Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR, 2004), do Ministério de Minas e Energia, o setor de saneamento utiliza 2,3% do total de energia elétrica consumida no país¹. Isso equivale a 7,0 TWh/ano. Nos sistemas de saneamento, a energia elétrica é utilizada principalmente nos conjuntos moto-bomba dos sistemas de abastecimento de água, transporte do esgoto e no tratamento de água e

¹ O Sistema Nacional de Informação em Saneamento (SNIS) ainda não disponibilizou os dados da evolução do consumo elétrico do setor nos últimos anos até o dia 15/04/2005.

esgotos. As despesas com energia elétrica têm sido crescentes no setor e podem ser consideradas, em muitos casos, como a segunda² maior despesa dentre os custos operacionais (MME, 2005).

Além disto, os sistemas de tratamento de esgoto consomem eletricidade. Logo, a implantação de sistemas deste tipo pode refletir em um aumento do total de energia elétrica consumida no setor sanitário. Existem diferentes tipos de processo biológicos de tratamento de efluentes, e o consumo de energia entre eles pode variar bastante. Os reatores aeróbios podem ser mecanizados e requerem energia elétrica nos processos de aeração. Os reatores anaeróbios não necessitam de energia elétrica, aproveitando a temperatura natural do líquido e a carga hidráulica para funcionar. A diferença de eficiência energética entre os dois processos deve ser levada em consideração nas tomadas de decisão em relação ao setor.

Além disto, a quantidade de biogás e lodo produzidos dependem do tipo de processo de tratamento. O maior volume de lodo demanda mais energia na estação, pois este deve ser bombeado, secado e transportado, e requer maior volume de aterro para a disposição final.

O biogás gerado pelos sistemas de tratamento contém uma concentração elevada de metano (CH_4), que pode ser usado como combustível. Segundo dados levantados pelo inventário brasileiro de emissões de metano, feita por Alves & Vieira (1998), os efluentes líquidos industriais e os esgotos emitiram aproximadamente 82,75 e 39,34 Gg CH_4 em 1990. Este valor aumentou para 86,27 e 43,09 Gg CH_4 em 1994, respectivamente. Entretanto, este estudo não informa a porcentagem de metano que pode ser recuperado. Essa estimativa considera o potencial de geração de biogás se todo o esgoto doméstico e industrial fosse tratado. Na realidade, uma fração muito pequena do gás recuperado é efetivamente usada para fins energéticos. Esta é uma fonte de energia renovável que está sendo desperdiçada.

O processo decisório quanto à implantação de sistemas de tratamento de efluentes líquidos é bastante complexo. Sem o apoio e o planejamento do setor público, dificilmente haverá um significativo aumento na porcentagem de esgotos tratados. Por esse motivo, as ações institucionais direcionadas para incentivar a universalização da cobertura de saneamento são essenciais. Existem várias barreiras para se atingir este objetivo. Estas barreiras devem ser analisadas e implementadas pelos diversos órgãos públicos interessados na questão. As estratégias, adotadas para atingir os objetivos dos programas de saneamento e energia, podem

² O maior custo do setor representa o da mão-de-obra

fornecer importantes informações quanto às tendências de uso de tecnologias de tratamento de esgotos mais eficientes, tanto energeticamente quanto na produção e aproveitamento do biogás.

4- Metodologia

A metodologia adotada para o desenvolvimento do presente trabalho parte de uma revisão da literatura referente ao tema de saneamento, especificamente na área de tratamento de efluentes líquidos, consumo e geração de energia desses processos.

Em relação aos autores referenciados nesta Dissertação, primeiramente foram consultados aqueles que tratavam do processo anaeróbio. Pauss (1987) apresenta em “Biogas production” os princípios do ecossistema anaeróbio, os tipos de reatores anaeróbios e as propriedades do biogás.

Chernicharo (1997) descreve em “Reatores Anaeróbios” o ecossistema anaeróbio detalhadamente e sobre a produção de biogás. O autor relaciona a remoção de matéria orgânica (DQO) com o metabolismo anaeróbio, e com a produção de biogás. Apresenta-se o balanço da DQO ao longo do processo anaeróbios. O autor também trata de questões termodinâmicas do processo anaeróbio e de reações químicas de conversão de matéria orgânica em ambientes anaeróbios. Outro assunto abordado é o requisito nutricional dos organismos anaeróbios. Além disto, trata-se do crescimento aderido e disperso dentro de um reator anaeróbio e do funcionamento de diferentes tipos de reatores anaeróbios.

Van Haandel & Lettinga (1994) apresentam aspectos termodinâmicos do processo anaeróbio, introduzindo a questão da sua eficiência energética. O autor analisa o conteúdo energético da matéria orgânica em diferentes etapas do processo anaeróbio até a produção de biogás. Apresenta-se a comparação detalhada dos processos de metabolismo dos organismos aeróbios e anaeróbios. Além disto, ele traça um paralelo entre a metanogênese e o ecossistema aeróbio, comparando parâmetros termodinâmicos, produção de lodo e geração de metano.

PROSAB (2001) descreve em “Pós-tratamento de efluentes de reator anaeróbio” a comparação de eficiência na remoção de DQO entre os processos aeróbio e anaeróbio. Isto é demonstrado através de um balanço de DQO ao longo dos dois processos. Este trabalho apresenta sistemas de tratamento utilizando reatores tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) seguido do sistema aeróbio de lodos ativados. Além disto, compara-se diferentes

parâmetros entre o sistema UASB com lodos ativados e o sistema de lodos ativados convencional. O trabalho expõe, entre outras características, os diferentes valores de potência instalada por habitante e de consumo energético anual por habitante, dos dois sistemas. São indicados os índices de solubilidade dos gases formadores do biogás. Por sua vez, são apresentados, em forma de ilustração, os dois sistemas de tratamento.

Von Speling (1997) em “Lodos Ativados” apresenta detalhadamente o dimensionamento do sistema de lodos ativados. São indicados os requisitos energéticos para aeração e a cinética de produção de lodo. Em “Princípios básicos do tratamento de esgoto”, von Sperling (1996) apresenta diferenças entre os organismos que realizam a remoção da matéria orgânica dos esgotos. Ele indica as diferenças em relação à fonte de energia e carbono, além dos agentes oxidantes usados pelos microrganismos. São apresentados os tipos de organismos dos sistemas aeróbios e o funcionamento deste ecossistema. Além disto, são apresentadas características cinéticas da remoção de matéria orgânica e produção de lodo, dos dois tipos de processos biológicos. O autor apresenta ainda, detalhes sobre o funcionamento hidráulico dos reatores, tipos de aeradores mecânicos e suas necessidades energéticas. Por sua vez, o autor apresenta o parâmetro de Densidade de Potência dos tanques de aeração. Em “Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos”, von Sperling (1995) apresenta as principais características dos esgotos, e descreve seus impactos no ecossistema natural. Além disto, ele discute, a luz da legislação vigente, quais os níveis de exigência para o lançamento de efluentes em corpos d’água no país. Neste trabalho, o autor ainda analisa os usos finais para a água e seus respectivos requisitos de qualidade.

Outro autor referenciado neste trabalho é Sawyer (1994), que em “Chemistry for Environmental Engineers” discute os ensaios para determinar a qualidade dos efluentes líquidos. Comparini (2001) e David (2002) apresentam características do lodo aeróbio e seus potenciais usos.

Alves & Vieira (1998) apresentam em “Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de Resíduos” o contexto de emissão de metano no tratamento de esgotos domésticos e industriais das áreas urbanas do país.

Os usos domésticos para o biogás são apresentados por Gotaas (1956) em “Composting”. Os usos industriais são apresentados pela Petrobrás e a geração de eletricidade a partir do biogás é apresentada por Cenbio (2004). Em “Geração de energia elétrica a partir de Biogás de

Tratamento de Esgoto”, o Cenbio (2004) compara diferentes tecnologias de geração de eletricidade usando o biogás e apresenta valores econômicos do aproveitamento desta fonte de energia. Este trabalho mostra as características químicas do biogás da ETE Barueri. O uso do biogás em ETEs é analisado por Borges (2004) em “Thermal hygienization of excess anaerobic sludge: a possible self-sustained application of biogas produced in UASB reactors”.

Para se discutir o contexto atual do setor de saneamento, utiliza-se o trabalho “O Pensamento do Setor de Saneamento no Brasil: Perspectivas Futuras”, que foi financiado pelo Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS). Este trabalho apresenta um histórico das tentativas de construção de uma política nacional do setor. Em “Uma Nova Agenda para o Saneamento”, Abicalil (2002) discute o contexto do serviço de saneamento e seus impactos sócio-ambientais. Além disto, debate os objetivos, dificuldades e estratégias para a universalização do serviço.

Em “Energia no Brasil: para que? Para quem?”, Bermann (2002) apresenta os potenciais das fontes de energias renováveis no país e discute os índices de sustentabilidade energética. Outro autor referenciado é Altomonte (2003), que em “Renewable energy and energy efficiency in Latin America and the Caribbean: constraints and prospects”, discute o contexto do uso de fontes renováveis de energia na América Latina e Caribe. Além disto, debate os objetivos, dificuldades e estratégias para ampliar o uso destas fontes no continente. Capriles apresenta em “Brasília 2003 – Bonn 2004” a agenda adotada pelos países que querem estimular as fontes renováveis de energia.

Por sua vez, Offe (1984) discute, em “Problemas Estruturais do Estado Capitalista”, questões relativas ao papel do estado e sua relação com o setor privado. Da mesma forma que Bobbio (1987), em “Democracia e Ditadura”.

A Dissertação está dividida em 5 capítulos. O capítulo I apresenta a introdução do trabalho, incluindo o objetivo, a justificativa e a metodologia. No capítulo II discutem-se os princípios biológicos e energéticos do tratamento de esgotos.

Na primeira parte do capítulo II são indicados os princípios do tratamento de efluentes líquidos, seus objetivos e suas conseqüências. Primeiramente, são indicadas as características indesejáveis dos efluentes líquidos, que são as partículas sedimentáveis, a matéria orgânica, os micro e macronutrientes e os organismos patogênicos.

Os processos biológicos são apresentados na segunda e terceira partes deste capítulo. Eles são caracterizados em relação às fontes de onde se obtêm sua energia e seu carbono, além dos agentes oxidantes utilizados. São identificadas as diferenças entre o catabolismo, o anabolismo, e o funcionamento dos ecossistemas dos processos aeróbios e anaeróbios.

A quarta parte do capítulo II, enfatiza-se os reatores biológicos. Eles apresentam diferentes características hidráulicas, possuem diferentes capacidades de absorção e remoção de carga orgânica e apresentam mecanismos de retenção de biomassa. São apresentados os principais sistemas de tratamento de efluentes líquidos, com ênfase naqueles a serem abordados nos estudos de caso.

Na quinta parte, os processos biológicos são analisados quanto ao consumo de energia química da matéria orgânica, a produção de biogás e lodo. Uma análise geral do consumo de energia elétrica nos sistemas aeróbio e anaeróbio também é feita. As informações são sintetizadas no balanço energético de cada processo.

As características físicas e químicas do biogás são apresentadas no item seis do capítulo II. Além disto, no item sete, são indicados possíveis usos do biogás nos domicílios, indústrias e Estações de Tratamento de Esgoto. A oitava parte, a última deste capítulo, apresenta informações sobre as propriedades do lodo gerado pelos processos biológicos e suas possibilidades de aproveitamento.

O capítulo III apresenta e analisa seis estudos de caso. Cada estudo de caso representa uma estação de tratamento de esgoto (ETE). Destas, quatro já se encontram em operação, uma está agora (maio de 2005) entrando em operação, e outra se encontra ainda em construção. Nos dois últimos casos foram analisados os dados de projeto. Em relação ao processo biológico, duas são aeróbias e quatro anaeróbias. Três estações em operação foram visitadas: ETE Barueri (Barueri, SP), ETE Arrudas (Belo Horizonte, MG) e ETE Santana (Varginha, MG). A qualidade e a confiabilidade dos dados obtidos não foram comprovadas, pois os dados foram passados pelos operadores sem mediação de um departamento de dados.

Os estudos de caso enfocam a dimensão energética das ETEs. São analisados dados sobre remoção de matéria orgânica, consumo de eletricidade, produção de biogás e lodo. Em alguns casos, indica-se as potências elétricas dos equipamentos da estação elevatória e dos aeradores/sopradores. São utilizados dois índices para a avaliação da eficiência energética das ETEs. O primeiro é a razão entre o consumo de eletricidade total por quantidade de matéria

orgânica removida. O segundo, no caso de ETEs aeróbias, é a potência dos equipamentos de aeração por volume de tanque (Densidade de Potência).

A ETE Barueri é o primeiro caso. É a maior estação de tratamento de esgotos do Brasil e se localiza no município de Barueri, na região metropolitana de São Paulo. Seu processo é aeróbio e o sistema é chamado “Lodos Ativados”. Esta ETE trata o esgoto de cerca de 3 milhões de pessoas.

O segundo caso é a ETE Arrudas, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte. Seu sistema também é por lodos ativados. Seu projeto foi dimensionado para tratar o esgoto de um milhão de habitantes, entretanto recebe aproximadamente metade do volume previsto.

Outra ETE estudada é a ETE Santana. Ela opera com processo anaeróbios. Seu sistema é formado por reatores UASB, sem pós-tratamento. Ela se localiza no município de Varginha, estado de Minas Gerais, e atende uma população de cerca de 80 mil pessoas.

O quarto estudo foi sobre a ETE Ipatinga, localizada no município mineiro de Ipatinga. Seu sistema também é formado por reatores UASB, sem pós-tratamento. Esta ETE recebe o esgoto de cerca de 140 mil pessoas.

O quinto estudo de caso, a ETE Onça, se localiza na região metropolitana de Belo Horizonte. Ela ainda está em construção. Seu processo é anaeróbio e o sistema é formado por reatores UASB. Esta ETE irá tratar o esgoto de aproximadamente um milhão de habitantes em Belo Horizonte. Existem duas possibilidades de pós-tratamento dos efluentes do reator UASB: uma possibilidade é através de filtros biológicos percoladores (FBP) e a outra é por um sistema de lodos ativados.

Por sua vez, o sexto estudo de caso, representado pela ETE Piçarrão, tem o tratamento anaeróbio antes do aeróbio. Seu sistema é formado por reatores UASB seguidos por um sistema de lodos ativados. Os dados desta ETE, apresentados neste trabalho, são de projeto. Esta ETE trata o esgoto de mais de 200 mil pessoas do município de Campinas.

Cada ETE apresenta um desempenho energético diferente. A comparação entre remoção de DQO pelo consumo elétrico total pode fornecer um parâmetro da eficiência energética entre as estações. Este parâmetro é comparado com dados teóricos. Além disto, deve-se avaliar a produção de lodo e biogás, e eventuais medidas de melhoria da eficiência energética de equipamentos elétricos em cada ETE. Os dados de cada estudo de caso foram

disponibilizados pelas empresas de saneamento responsáveis. Os contatos com as empresas foram realizados através de telefone, internet, e-mail ou pessoalmente. Os casos selecionados abrangem processos biológicos diferentes, possibilitando uma visão mais ampla. Além disto, optou-se por estudar sistemas de maior porte, pois o consumo elétrico e a produção de biogás são maiores. A partir dos dados obtidos nas companhias de saneamento e dados teóricos de consumo de eletricidade, produção de lodo e geração de biogás, foi elaborada uma avaliação dos diferentes sistemas de tratamento de efluentes líquidos.

No capítulo IV, avaliam-se as ações institucionais relacionadas às áreas de saneamento, eficiência energética no saneamento e energias renováveis. As iniciativas analisadas são as que buscam a universalização do sistema de tratamento de esgotos, a redução e o uso eficiente de energia elétrica no setor ou o aproveitamento de energias renováveis provenientes deste setor. Entre os programas incluídos neste trabalho referentes à área de saneamento estão: o Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR) do Ministério de Minas e Energia (MME), o Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES) da Agência Nacional das Águas (ANA), o Programa de Saneamento Ambiental Urbano e o Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS), estes dois últimos geridos pelo Ministério das Cidades (MCidades). O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) do Ministério de Minas e Energia é a iniciativa analisada neste trabalho em relação ao uso de energias renováveis. A avaliação destas iniciativas deve direcionar-se para a possibilidade de aproveitamento e aplicação das vantagens energéticas dos sistemas de tratamento.

Por fim, no capítulo V apresentam-se conclusões e recomendações relativas às políticas sanitárias e energéticas, aos estudos de caso e à eficiência energética dos processos biológicos.

Capítulo II - Princípios biológicos e energéticos do tratamento de efluentes

O objetivo do tratamento de efluentes líquidos é corrigir suas características indesejáveis de modo a atender alguns requisitos de qualidade. A poluição da água limita seu uso em diversas finalidades dependendo do nível de qualidade exigido. Além disto, trás conseqüências negativas para a economia. Dependendo das suas características, a água pode ser usada para alguns fins e ser inviável para outros. O tratamento deve garantir a qualidade exigida para o uso. Os usos mais comuns são: abastecimento doméstico, abastecimento industrial, irrigação, dessedentação de animais, preservação da flora e da fauna, recreação e lazer, geração de energia, transporte e diluição de despejos. Os requisitos de qualidade para cada uso final são definidos pela Resolução CONAMA nº20, de 18/06/86.

A Resolução CONAMA nº20, de 18/06/86, também define os padrões de qualidade para os efluentes de sistemas de tratamento³ e para o corpo receptor. Esses padrões para lançamento de efluentes no corpo d'água, e os padrões de qualidade do corpo receptor, definidos por lei, são exigidos pelas entidades ligadas a água.

Os efluentes de estações de tratamento devem atender os padrões de lançamento no corpo receptor, sem comprometer os padrões de qualidade do próprio corpo receptor. A definição das características do efluente tratado é feita por órgãos estaduais ligados as questões ambientais. Entres as características definidas está a concentração máxima de: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Sólidos em Suspensão (SS). Entretanto, essas concentrações também dependem dos estudos de autodepuração dos corpos receptores. Se o corpo receptor se encontra no limite de sua capacidade de recebimento de poluentes, os efluentes devem ter maior remoção de características indesejáveis, reduzindo suas concentrações a valores ainda menores que o limite legal.

Os corpos receptores são definidos em classes. A Resolução CONAMA nº20, de 18/06/86, define nove classes de qualidade do corpo receptor e seus respectivos usos finais. Cada classe possui um conjunto de características físico-químicas que determinam sua qualidade. Dependendo da classe, a legislação define quais são os usos finais possíveis para aquele corpo d'água. De acordo com a legislação, cada classe possui várias características que devem ser

³ Com exceção das concentrações de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Sólidos em Suspensão (SS). Nestes casos o valor deve ser consultado na legislação estadual.

observadas, analisadas e respeitadas. A concentração de oxigênio dissolvido, cor, turbidez, sabor e odor, temperatura, material flutuante, óleos e graxas, corantes artificiais, pH, carga orgânica, sólidos, coliformes e de diversos compostos químicos devem ser mantidas em níveis que favoreçam a qualidade do corpo receptor.

Com base nas especificações da mínima qualidade do efluente final, o sistema de tratamento deve ser capaz de atendê-las com segurança. Além de desenvolver um processo que seja tecnicamente viável, deve-se levar em consideração: os custos de implantação e operação, a sustentabilidade no fornecimento de insumos⁴, a disponibilidade de material de construção e equipamentos, a disponibilidade de área para aterrar ou utilizar o lodo bem como a disponibilidade de mão-de-obra especializada.

1 – Composição e características dos efluentes líquidos

O sistema de tratamento é capaz de remover dos esgotos domésticos pelo menos um dos seguintes constituintes indesejáveis: os sólidos em suspensão, a matéria orgânica, os nutrientes e os organismos patogênicos.

Nos sistemas de tratamento de efluentes, a remoção dos constituintes é feita em etapas. Existem etapas de pré-tratamento, tratamento primário, secundário e terciário. Geralmente, as três primeiras etapas removem a maior parte dos sólidos e da matéria orgânica. Os patogênicos e os nutrientes são removidos nos sistemas com tratamento terciário.

As características químicas e biológicas dos efluentes líquidos domésticos variam, conforme mostrado nas tabelas 2.1 a 2.5. Campos e von Sperling (1995, p.80), utilizaram dados de esgotos de nove sub-bacias da cidade de Belo Horizonte e concluíram que a composição e concentração das impurezas nele dependem do comportamento socioeconômico da população envolvida. Elas também dependem do padrão de uso da água pelas comunidades, da presença de indústrias, do tipo de sistema de coleta dos efluentes e do tamanho do sistema de coleta.

1.1 - Sólidos

Segundo von Speling (1995), os sólidos reduzem a penetração da luz no líquido, dificultando a fotossíntese, podem ser formados por compostos tóxicos e servem de abrigo a organismos patogênicos, dão uma aparência estética desagradável. Eles são classificados segundo

⁴ Que são: energia elétrica, compostos químicos e polímeros.

características de sedimentação, de tamanho e composição química. A tabela 2.1 mostra quantidade dos sólidos encontrados nos esgotos domésticos brutos.

Tabela 2.1: Presença de sólidos nos esgotos domésticos brutos

Parâmetro	Concentração (mg/L)	
	Faixa	Típico
Sólidos Totais (ST)	700 - 1350	1100
*em suspensão (SST)	200 - 450	400
Fixos (SSF)	40 - 100	80
Voláteis (SSV)	165 - 350	320
*dissolvidos (SDT)	500 - 900	700
Fixos (SDF)	300 - 550	400
Voláteis (SDV)	200 - 350	300
*sedimentáveis	10 - 20	15

Fonte: Adaptado de von Sperling (1995, p.79).⁵

Em relação às características de sedimentação, são divididos em sólidos dissolvidos, colóides e matéria particulada. Os dois últimos tipos formam o grupo de sólidos em suspensão. Uma fração dos sólidos em suspensão pode ser removida por precipitação por gravidade. De forma geral, um terço dos sólidos em suspensão presentes nos esgotos sedimentará, outro terço em suspensão não sedimentará e um terço final permanecerá dissolvido. Em laboratório, a determinação da fração sedimentável é feita colocando o efluente bruto por uma hora no CONE IMHOFF e medindo a quantidade de sólidos no fundo depois deste período.

O teste que distingue sólidos dissolvidos e em suspensão considera o tamanho das partículas. Ele compara a quantidade de sólidos no efluente “in natura” e depois de filtrado. A parcela que passa por um filtro padronizado está dissolvida, aquela que fica está em suspensão.

Outra caracterização dos sólidos é feita quanto a sua parcela orgânica e a parcela inerte. O aquecimento dos sólidos em 550°C incinera a parcela orgânica, que se decompõem e transforma-se em gases. Esta parcela também é denominada de volátil. A parcela inorgânica, ou inerte, permanece inalterada na amostra. Portanto, a fração orgânica, ou volátil, é determinada pela diferença de peso antes e depois da incineração dos sólidos totais. A parcela inorgânica representa o peso final da amostra após a incineração.

⁵ Os dados indicados em von Sperling (1995) foram apresentados por: Arceivala (1981), Jordão e Pessoa (1982), Qasim (1985), Metcalf & Eddy (1991) e pelo próprio autor.

1.2 - Matéria Orgânica

A matéria orgânica é de extrema importância na caracterização dos efluentes líquidos. Ela causa a diminuição da concentração de oxigênio na água. Os microrganismos utilizam a matéria orgânica e consomem oxigênio para seu metabolismo. Eles são os principais responsáveis pela sua remoção. A partir dela, uma grande quantidade de microrganismos obtêm energia e matéria (von Sperling, 1995).

O metabolismo pode ser determinado a partir da variação da concentração da matéria orgânica presente no efluente. Para descrever o metabolismo, é necessário quantificar a concentração de matéria orgânica. Entretanto, o efluente contém uma mistura heterogênea de diversos compostos orgânicos, e a caracterização do metabolismo de cada um não é prática. Para contornar este problema utiliza-se a possibilidade de oxidação destes compostos orgânicos como parâmetro para se medir o metabolismo.

A caracterização da matéria orgânica dos efluentes é obtida indiretamente através de dois testes. Ambos quantificam a matéria orgânica em termos de quantidade de oxigênio e são apresentados por Sawyer (1994) e von Sperling (1995).

1.2.1 - DBO

A oxidação da matéria orgânica ocorre quando os microrganismos aeróbios degradam esse substrato utilizando o oxigênio dissolvido no meio líquido como receptor de elétrons. A quantidade de oxigênio utilizada por volume de efluente é denominada de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).

Existe uma relação direta entre a quantidade de matéria orgânica biodegradável e a quantidade de oxigênio necessária para que os microrganismos façam sua estabilização. No teste da DBO, uma amostra do efluente é inoculada com microrganismos aeróbios e o oxigênio é diluído até a saturação. São usados alguns tubos de ensaio com diferentes diluições da amostra, para que no final nem todos os tubos estejam completamente sem oxigênio. Desta forma, pode-se determinar quanto de oxigênio foi utilizado para cada diluição de efluente determinada. São necessários vários dias para que os organismos removam toda a DBO. Para encurtar o tempo, padronizou-se um ensaio com duração de cinco dias numa temperatura constante de 20°C. Logo, a DBO_5 equivale à concentração de matéria orgânica, ou carga orgânica, biodegradável removida pelos microrganismos aeróbios durante cinco dias de

ensaio, ou a quantidade de oxigênio utilizada neste período num determinado volume de efluente.

A DBO última equivale ao consumo de toda a matéria orgânica biodegradável, e pode levar semanas, dependendo do tipo de moléculas presentes no efluente. Não existe uma relação direta entre a DBO_5 e a DBO última; portanto, as duas devem ser determinadas. Além de caracterizar a concentração de matéria orgânica, o teste da DBO tem a vantagem de obter informação sobre a velocidade de degradação do substrato. Entretanto, a DBO não é um teste adequado para indicar a biodegradabilidade dos compostos orgânicos por organismos anaeróbios.

1.2.2 - DQO

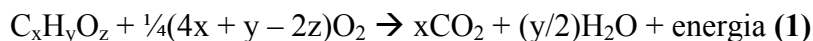
Além do oxigênio, outros agentes oxidantes podem degradar os compostos orgânicos dos efluentes líquidos. A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um teste padronizado que utiliza uma mistura de dicromato e ácido sulfúrico, que são os dois mais fortes agentes oxidantes conhecidos. Adiciona-se sulfato de prata para catalisar a reação e eleva-se a temperatura da mistura a 150°C , para que a reação ocorra rapidamente. O resultado é determinado num período de duas horas, tempo suficiente para que toda matéria orgânica presente no efluente esteja oxidada. Logo, a rapidez dos resultados é uma das maiores vantagens deste teste.

A concentração inicial de matéria orgânica pode ser obtida conhecendo-se a quantidade de dicromato utilizada. A diminuição de dicromato na amostra pode ser obtida através das técnicas de titulação ou de espectrometria. Os dados obtidos são comparados com uma amostra de concentração conhecida de matéria orgânica, para se garantir a completa oxidação.

Da mesma forma que a DBO, o resultado da DQO é proporcional a concentração de matéria orgânica no efluente. A unidade da DQO é dada em massa de oxigênio por volume de líquido. Entretanto, os valores da DQO são superiores ao da DBO. A DQO oxida até mesmo a matéria orgânica não biodegradável do efluente líquido. A lignina, por exemplo, é oxidada completamente. Além disto, parte do substrato no teste da DBO última transforma-se em material celular, e não é contabilizado pela oxidação. Por isso, os valores da DQO são superiores ao da DBO última; e esta diferença cresce na medida que mais matéria orgânica resistente aos microrganismos estiver presente. A transformação dos valores da DQO em

DBO pode ser feita por correlação estatística. Obtendo-se a correlação, pode-se fazer apenas o teste da DQO, pois é mais preciso e mais rápido de ser executado.

O resultado obtido no ensaio pode ser comparado com o valor teórico definido por Haandel & Lettinga (1994) na equação (1) que se segue:



Nesta reação, para cada mol de composto orgânico ($C_xH_yO_z$), necessita-se de $\frac{1}{4}(4x + y - 2z)$ mol de O_2 , ou $\frac{32}{4}(4x + y - 2z)$ grama de O_2 /mol, ou gDQO/mol. Substituindo o composto $C_xH_yO_z$ pelo metano (CH_4), obtemos uma DQO de $\frac{32}{4}(4 + 4)$ gramas de O_2 , ou 64 gramas de O_2 . Logo, a relação da DQO com o metano é de quatro gramas de DQO por grama de CH_4 .

Von Sperling (1995) apresenta alguns valores de DBO e DQO nos esgotos. A tabela 2.2, a seguir, indica a contribuição per capita de matéria orgânica nos esgotos domésticos e as respectivas faixas de concentração.

Tabela 2.2: Presença de matéria orgânica nos esgotos domésticos brutos

Parâmetro	Contribuição per capita (g/hab.dia)		Concentração (mg/L)	
	Faixa	Típico	Faixa	Típico
Matéria Orgânica				
DBO ₅	40 - 60	50	200 - 500	350
DQO	80 - 130	100	400 - 800	700
DBO última	60 - 90	75	350 - 600	500

Fonte: Adaptado de von Sperling (1995, p.79).⁵

Calcula-se, a partir da tabela 2.2, que um habitante produz por ano entre 28,8 e 46,8 kgDQO.

Van Haandel & Lettinga (1994) apresentam os valores de DQO de diversos compostos orgânicos encontrados nos esgotos, como mostra a tabela 2.3 que se segue. Observa-se na primeira coluna da tabela 2.3 o nome de alguns compostos orgânicos presentes nos efluentes líquidos domésticos. Na segunda, indica-se o peso molecular de um mol dos compostos da primeira coluna. A terceira coluna apresenta a quantidade de DQO consumida para oxidar um mol de cada composto. Na quarta coluna, mostra-se a relação de gramas de DQO por grama de composto orgânico.

Tabela 2.3: Valores de DQO por unidade de massa de alguns compostos orgânicos.

Composto	gComposto /molComposto	gDQO /molComposto	gDQO/ gComposto
ácido oxálico	90	16	0,18
Ácido fórmico	46	16	0,35
Ácido cítrico	192	144	0,75
Glicose	180	192	1,07
Ácido láctico	90	96	1,07
ácido acético	60	64	1,07
glicerina	92	112	1,22
Fenol	94	224	2,38
benzeno	78	240	3,08
acetona	58	128	2,21
Etileno	28	96	3,43
Etanol	46	96	2,09
metanol	32	48	1,50
Etano	30	112	3,73
metano	16	64	4,00

Fonte: Adaptado de van Haandel & Lettinga (1994)

1.3 – Outras características dos Efluentes Líquidos

Além dos sólidos e matéria orgânica, os efluentes líquidos contêm nutrientes e organismos patogênicos. Os nutrientes são essenciais aos processos biológicos, aeróbio e anaeróbio. A remoção completa do nitrogênio só é possível nos processos aeróbios, com a desnitrificação. Sua oxidação consome oxigênio dissolvido no líquido. A tabela 2.4 apresenta as diversas formas que ele pode aparecer no líquido. Conforme citado por von Sperling (1995), o nitrogênio pode induzir o crescimento acelerado de algas, o nitrato pode causar doenças em bebês e a amônia pode ser tóxica aos peixes. Os valores usuais de nutrientes (nitrogênio e fósforo), nos efluentes domésticos brutos, são mostrados nas tabela 2.4 e 2.5 abaixo.

Tabela 2.4: Presença de nitrogênio nos esgotos domésticos brutos

Parâmetro	Concentração (mgN/L)	
	Faixa	Típico
Nitrogênio total (N)	35 – 70	50
*Nitrogênio orgânico	15 – 30	20
*Amônia (NH ₃)	20 – 40	30
*Nitrito (NO ₂)	0	0
*Nitrato (NO ₃)	0 – 2	0

Fonte: Adaptado de von Sperling (1995, p.79).⁵

Tabela 2.5: Presença de fósforo nos esgotos domésticos brutos

Parâmetro	Concentração (mgP/L)	
	Faixa	Típico
Fósforo	5 – 25	14
*Fósforo orgânico	2 – 8	4
*Fósforo inorgânico	4 – 17	10

Fonte: Adaptado de von Sperling (1995, p.79).⁵

O fósforo não está associado a doenças. Entretanto, sua presença pode induzir um excessivo crescimento de algas em lagos. O fósforo compõe a molécula orgânica que armazena energia no interior dos organismos: a Adenosina Tri-fosfato (ATP). Essa molécula é essencial para o metabolismo.

Outra característica importante dos efluentes líquidos domésticos é a presença de microrganismos. As concentrações deles nos esgotos estão indicadas na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Presença de microrganismos nos esgotos domésticos brutos

Microrganismo	Concentração (org/100ml)
Bactérias Totais	$10^9 - 10^{10}$
Coliformes Totais	$10^6 - 10^9$
Coliformes Fecais	$10^5 - 10^8$
Estreptococos Fecais	$10^5 - 10^6$
Cistos de Protozoários	$<10^3$
Ovos de Helminetos	$<10^3$
Vírus	$10^2 - 10^4$

Fonte: Adaptado de von Sperling (1995, p.79).⁵

Pode-se notar uma elevada concentração de bactérias nos esgotos. Os coliformes são usados como indicadores de contaminação fecal da água. Os esgotos apresentam organismos causadores de doenças. Von Sperling (1995) apresenta uma lista de doenças de veiculação hídrica. Entretanto, os sistemas de tratamento em nível secundário (remoção de sólidos e matéria orgânica), que operam com baixo tempo de detenção hidráulico, têm baixa eficiência de remoção deles.

2 – Processos biológicos de tratamento de efluentes líquidos

Para remover as características indesejáveis dos efluentes líquidos são usados processos físicos, químicos e biológicos. Os processos físicos são usados no tratamento preliminar dos efluentes, removendo sólidos grosseiros e areia. Posteriormente ajudam a separar os produtos dos processos químicos e biológicos do efluente final. Portanto, este é o principal processo de

remoção de sólidos do efluente. A adição de produtos químicos pode auxiliar no tratamento de efluentes.

Os processos biológicos são os principais responsáveis pela remoção da matéria orgânica e dos nutrientes do esgoto. Se forem aplicados simultaneamente com processos físicos e químicos resultam numa melhora da eficiência dos sistemas de tratamento. Ao consumirem a matéria orgânica os microorganismos crescem e se aglomeram, formando flocos e grânulos que são removidos do líquido por sedimentação. Além disto, produzem gases a partir da matéria orgânica. Estes gases formam bolhas que se desprendem do líquido. Entre os gases gerados destacam-se: o gás carbônico (CO_2) e o metano (CH_4). A qualidade dos gases resultantes do processo depende do tipo de respiração microbiana. A respiração pode ser aeróbia ou anaeróbia, e é uma etapa do metabolismo dos microorganismos.

2.1 - Metabolismo aeróbio e anaeróbio

Para crescerem, locomoverem, reproduzirem e realizarem todas as outras funções vitais, os microorganismos necessitam basicamente de energia, carbono e nutrientes (nitrogênio, fósforo, enxofre, potássio, cálcio, magnésio, e micronutrientes).

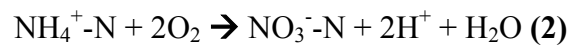
O substrato é uma mistura composta por sólidos e pode estar na forma particulada (em suspensão) ou solubilizada (dissolvida). O substrato é formado pela matéria orgânica presente no meio líquido. A matéria orgânica fornece energia, carbono e nutrientes, necessários aos processos biológicos. A matéria orgânica é removida dos efluentes líquidos pelos microorganismos no processo de catabolismo. Os microorganismos aeróbios ainda necessitam do oxigênio dissolvido para viverem.

Von Sperling (1996) indica duas categorias de organismos quando se refere ao tipo de fonte de carbono utilizado. Os organismos autótrofos são capazes de processar e utilizar o carbono do gás carbônico. O outro grupo de microorganismo, capaz de utilizar o carbono encontrado na matéria orgânica, é chamado heterótrofo.

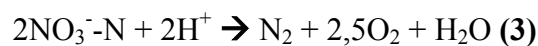
Outra diferença entre os microorganismos, citada por von Sperling (1996), é relativa à sua fonte de energia. Os organismos capazes de utilizar a energia luminosa são chamados de fototróficos. Além destes existem os organismos heterotróficos, ou quimiotróficos, aqueles que utilizam a energia de reações químicas como fonte de energia. Devido a turbidez dos efluentes líquidos, é quase nula a penetração da luz neles. Portanto, a presença de organismos

fototróficos é praticamente inviável em sistemas de tratamento de esgotos, com exceção de alguns tipos de sistemas por lagoa. Desta forma, os organismos mais importantes no processo de tratamento de efluentes líquidos são os quimiotróficos.

Os organismos quimiotróficos são divididos em quimioautótrofos e quimioheterótrofos. Os quimioautótrofos utilizam o carbono do gás carbônico e a energia química de matéria inorgânica. Entre os quimioautótrofos estão aqueles responsáveis pela nitrificação e desnitrificação. A nitrificação é feita por dois gêneros de bactérias, as *Nitrosomonas* e as *Nitrobacter*. O resultado da ação destas bactérias é a transformação do íon amônio (NH_4^+) em nitrato (NO_3^-), resumido pela equação (2).



A desnitrificação é a redução do nitrato a nitrogênio mostrado na equação (3) simplificada abaixo.



Os quimioheterótrofos utilizam o carbono e a energia química da matéria orgânica. Estes são os principais responsáveis pelas reações de estabilização da matéria orgânica no processo de tratamento biológico. As principais características e diferenças entre os microrganismos quimiotróficos, em relação à fonte de carbono e energia, estão listadas na tabela 2.7 abaixo.

Tabela 2.7: Classificação dos organismos quimiotróficos baseada nas fontes de energia e carbono.

Classificação	Fonte de energia	Fonte de carbono	Organismos representativos
Quimio-Autótrofos	Matéria inorgânica	CO_2	Bactérias
Quimio-Heterótrofos	Matéria orgânica	Matéria orgânica	Bactérias, Fungos, Protozoários e Animais

Fonte: Adaptado de von Sperling (1996)

Dentro das células ocorre um conjunto de reações químicas que caracterizam o processo metabólico. Conforme apresentado por Von Sperling (1996), o metabolismo divide-se em duas etapas: o catabolismo e o anabolismo. O catabolismo, também chamado de desassimilação, ocorre quando a matéria orgânica é usada para obtenção de energia. Nesta etapa o substrato é degradado no interior dos microrganismos. As células armazenam a energia liberada neste processo. A forma usual de armazenamento é através da ATP

(adenosina tri-fosfato). A ATP pode ser transformada posteriormente em ADP (adenosina difosfato) para liberação da energia.

Os organismos aeróbios usam o oxigênio, o nitrato ou o sulfato como agentes oxidantes no catabolismo. Para serem utilizados pelos organismos estes oxidantes devem estar dissolvidos no líquido. Segundo von Sperling (1995), a função dos agentes oxidantes é receber os elétrons disponibilizados pela oxidação dos compostos orgânicos e inorgânicos. Portanto, são também chamados de aceptores de elétrons. Os elétrons apresentam carga negativa. Ao receberem os elétrons os aceptores de elétrons têm seu estado de oxidação reduzido. Na oxidação, os compostos orgânicos e inorgânicos perdem um ou mais elétrons, e passam para um estado de oxidação mais elevado. Portanto, estes compostos são também doadores de elétrons.

De acordo com von Sperling (1996), na presença simultânea de vários tipos de agentes oxidantes dissolvidos, os microrganismos utilizam primeiro aquele que libera maior quantidade de energia. A energia máxima disponível no processo é a diferença do conteúdo energético entre o composto inicial e o produto final da reação.

Segundo von Sperling (1996, p.24), a seqüência de utilização dos aceptores de elétrons depende do estado de oxidação do composto. O estado de oxidação é medido através do seu potencial de oxi-redução (expresso em mV). Se o potencial de oxi-redução (redox) do composto for positivo, este está em condições aeróbias. Nestas condições ocorre a oxidação da matéria orgânica e a nitrificação. Quando o potencial de oxi-redução estiver próximo de zero, o meio está em estado anóxico e poderá ocorrer a desnitrificação. O potencial de oxi-redução pode se tornar negativo, e neste caso o meio estará propício para processos anaeróbios. A dessulfatação ocorre primeiro em ambientes anaeróbios, seguido dos processos de acidogênese, acetogênese e por último a metanogênese. Nesta seqüência, o primeiro inicia no estado de oxi-redução menos negativo e segue até a metanogênese, que ocorre em um estado de oxi-redução mais negativo que os outros.

Von Sperling (1996) explica que a quantidade máxima de energia contida no composto depende do seu estado de oxidação. Quanto mais reduzido, ou quanto menor seu estado de oxidação, maior a quantidade de energia que pode ser liberada do composto. Após a oxidação, o estado de oxi-redução do composto aumenta, e conseqüentemente seu conteúdo energético diminui. Neste processo de transferência de elétrons a energia química é liberada. Quando a oxidação ocorre no interior das células, elas podem armazenar essa energia na forma de ATP.

O anabolismo refere-se às reações de síntese de novas células. Segundo von Sperling (1996), parte da energia obtida na desassimilação da matéria orgânica é usada nesta etapa. O anabolismo é também chamado de assimilação. Esta é a etapa de crescimento e multiplicação das células. O crescimento líquido da biomassa ocorre quando a assimilação é maior que a desassimilação.

A transferência de elétrons ocorre através de complexas reações bioquímicas, intermediadas por enzimas. De acordo com von Sperling (1996), as reações de ambas as etapas, do anabolismo e do catabolismo, ocorrem numa seqüência complexa. Algumas fases ainda não são bem definidas e alguns produtos intermediários também não são claramente identificados. Cada etapa é catalizada por um conjunto de enzimas. As enzimas que atuam no interior das células e são chamadas de endoenzimas. Elas agem sobre os compostos que atravessam a membrana celular, ou seja, a matéria orgânica que está dissolvida e é de fácil degradação.

Segundo von Sperling (1996), outras enzimas são lançadas para fora das células e denominam-se exoenzimas. Estas são responsáveis pela etapa de hidrólise, que quebra moléculas maiores para que possam ser absorvidas, metabolizadas e estabilizadas pelas células. As exoenzimas atuam na parte biodegradável da fração particulada. A energia liberada nas reações de hidrólise não é aproveitada e não necessita de aceptores de elétrons.

Von Sperling (1996) divide o catabolismo em: oxidativo e fermentativo. A diferença entre eles está no ambiente de oxidação. No catabolismo oxidativo o substrato é oxidado num ambiente aeróbio e anóxico, utilizando um agente oxidante, numa reação de oxi-redução. O catabolismo fermentativo ocorre em ambiente anaeróbio.

Além disto, von Sperling (1996) esclarece que não existe um agente oxidante no catabolismo fermentativo. De fato os elétrons são rearranjados entre os produtos, ficando um com maior estado de oxidação e o outro com menor. Pelo menos dois produtos são formados neste processo. Várias seqüências de reações fermentativas ocorrem até se formarem produtos inertes. Quando se tornam inertes, ou estabilizados, os produtos não podem mais reagir.

Uma lista de aceptores de elétrons dos processos biológicos de tratamento de efluentes líquidos está mostrada na tabela 2.8, que se segue, com seus respectivos ambientes de oxidação.

Tabela 2.8: Aceptores de elétrons nos processos biológicos de tratamento de esgoto

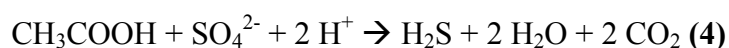
Tipos de Catabolismos	Aceptor de Elétron	Forma doceptor Após a reação	Processo
Catabolismo oxidativo	Oxigênio (O ₂)	H ₂ O	Metabolismo Aeróbio
	Nitrato (NO ₃ ⁻)	Nitrogênio Gasoso (N ₂)	Redução de nitrato (desnitrificação)
Catabolismo fermentativo	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	Sulfeto(H ₂ S)	Redução de sulfato (dessulfatação)
	Dióxido de carbono (CO ₂)	Metano (CH₄)	Metanogênese

Fonte: Adaptado de von Sperling (1996, p.17)

A seguir, as características dos processos metabólicos serão apresentadas mais detalhadamente.

2.1.1 – Catabolismo oxidativo

Na presença de agentes oxidantes os organismos realizam catabolismo oxidativo, também chamado de respiração aeróbia. Muitos grupos de microrganismos quimiotróficos utilizam o oxigênio dissolvido no meio aquoso. Mas, segundo von Sperling (1996), a respiração não restringe apenas ao oxigênio, pois o catabolismo oxidativo também ocorre utilizando o nitrato (NO₃⁻) e o sulfato (SO₄²⁻) como receptores de elétrons. Estes agentes oxidantes são encontrados nos efluentes, mas também podem ser formados durante o processo biológico aeróbio. O primeiro agente oxidante utilizado pelos microrganismos é o oxigênio, pois libera maior quantidade de energia que os outros. Na ausência de oxigênio, microrganismos específicos passam a utilizar o nitrato disponível como agente oxidante, conforme a equação (3) mostrada anteriormente. A presença de nitrato é um indicador do meio líquido anóxico. Este é transformado em nitrogênio gasoso num processo conhecido como desnitrificação. Para von Sperling (1996), o catabolismo oxidativo prossegue quando o meio líquido se torna anaeróbio; neste caso utilizando apenas o sulfato para a oxidar a matéria orgânica, conforme a equação (4).



Observa-se que o enxofre na reação (4) passa do estado de oxidação 6+, na forma de sulfato, para 2-, na forma de sulfeto. O hidrogênio que é transferido ao enxofre equivale ao elétron disponibilizado na respiração bacteriana. A reação de oxi-redução acima mostra que a matéria orgânica, no caso ácido acético, foi estabilizada, ou seja, é transformada em compostos

inertes. A forma final da matéria orgânica após a oxidação é o gás carbônico (CO₂). No gás carbônico, o carbono apresenta-se na sua forma inorgânica de estado de oxidação mais elevado, com valor 4+.

O processo de estabilização da matéria orgânica libera energia. A energia contida em alguns compostos orgânicos encontrados em efluentes líquidos, e que pode ser liberada na reação de oxidação, está indicada na tabela 2.9.

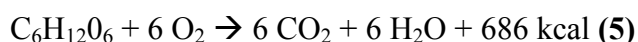
Tabela 2.9: Valores energéticos de alguns compostos orgânicos.

Composto	gComposto /mol	kcal/mol
Ácido oxálico	90	82
Ácido fórmico	46	68
Ácido cítrico	192	916
Glicose	180	686
Ácido láctico	90	326
Ácido acético	60	207
Glicerina	92	387
Fenol	94	723
Benceno	78	761
Acetona	58	410
Etileno	28	314
Etanol	46	312
Metanol	32	165
Etano	30	344
Metano	16	191

Fonte: Adaptado de van Haandel & Lettinga (1994)

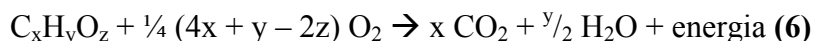
Observa-se que os valores variam muito em termos de kcal/mol entre os compostos. O ácido fórmico é o composto que libera a menor quantidade de energia por mol (68 kcal/mol). O ácido cítrico libera 916 kcal/mol, ou seja, treze vezes mais energia que o ácido fórmico.

Como exemplo, pode-se considerar a estabilização da glicose de acordo com a equação simplificada⁶ (5) a seguir.



⁶ Não foram analisadas diferentes etapas da reação.

A equação (5) mostra a reação química de estabilização da glicose. Nela, uma quantidade de oxigênio é utilizada, há produção de gás carbônico e liberação de energia. Para van Haandel & Lettinga (1994) o catabolismo oxidativo aeróbio segue a reação (6).



As reações (5) e (6) são exotérmicas. A energia liberada na reação (6) depende do composto ($C_xH_yO_z$) sendo oxidado. Quanto menor o estado de oxidação inicial do composto, maior é a energia liberada; pois o produto final indicado será sempre o gás carbônico, que é o estado mais oxidado do carbono.

2.1.2 – Catabolismo fermentativo

Quando oxigênio e nitrato não se encontram disponíveis no líquido, o ambiente se torna anaeróbio e um grupo de bactérias anaeróbias estritas se desenvolve. Estes organismos obtêm energia da matéria orgânica através do processo do catabolismo fermentativo.

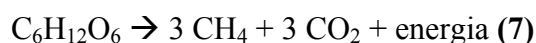
Neste processo, as bactérias anaeróbias liberam a energia armazenada nos compostos orgânicos reorganizando os elétrons dos compostos orgânicos e produzindo pelo menos dois produtos. Segundo von Sperling (1996), um dos produtos é o CO_2 , cujo estado de oxidação do carbono é o mais elevado (4+). O outro produto é o metano, cujo estado de oxidação do carbono é o mais reduzido (4-). Portanto, não se utiliza agente oxidante neste processo. Além disto, deve-se observar que o oxigênio é um forte inibidor do crescimento das bactérias anaeróbias, principalmente para aquelas responsáveis pela produção de metano.

Durante os vários estágios de catabolismo fermentativo, as moléculas complexas são sintetizadas em compostos simples e posteriormente em ácidos graxos, hidrogênio e CO_2 . Na última etapa, as bactérias metanogênicas utilizam o acetato, o hidrogênio e o CO_2 para produzirem CH_4 . Estes gases são pouco solúveis no meio líquido. A consequência da digestão anaeróbia é a diminuição da concentração da matéria orgânica no líquido. O carbono é separado do líquido através da produção dos gases e de lodo. Essa diminuição pode ser identificada medindo-se a diferença da DQO no afluente e no efluente final.

Hulshof (1995 apud Chernicharo 1997, p.34) apresenta em forma detalhada o balanço de DQO no processo anaeróbio de tratamento de efluentes líquidos. Para ele, os compostos orgânicos podem ser classificados como de fácil degradação, difícil ou impossível. A partir do seu trabalho pode-se identificar as frações de DQO biodegradáveis, acidificáveis,

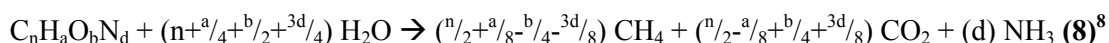
recalcitrantes. A DQO biodegradável é a parcela da DQO que pode ser transformada no meio anaeróbio. A DQO acidificável é a parcela da DQO biodegradável que não foi usada para formação de material celular e está disponível para as bactérias metanogênicas produzirem metano. Parte da DQO acidificável sai pelo efluente do processo sem ser convertida a metano. A DQO recalcitrante é a parcela biologicamente resistente, esta não pode ser convertida pelos organismos anaeróbios. Logo, a DQO removida é a parcela convertida em material celular mais a parcela transformada em metano. A DQO não removida é a parte recalcitrante mais a DQO acidificável que sai pelo efluente final.

Von Sperling (1997) mostra, a partir da equação (7), a conversão anaeróbia de glicose de forma simplificada⁷.



Nota-se que nessa reação de estabilização, parte da matéria carbonácea é reduzida a metano (CH_4) e parte é oxidado a CO_2 . Além disso, nenhum oxigênio é utilizado no processo. Parte da energia contida na glicose é liberada.

Existe uma diversidade de compostos orgânicos nos efluentes líquidos. Para serem usadas pela biomassa anaeróbia, ela deve se adaptar ao tipo de composto existente. De acordo com Chernicharo (1997), a equação estequiométrica de Buswell (8) permite prever a quantidade máxima de metano que será produzida a partir da composição química da matéria orgânica do efluente.



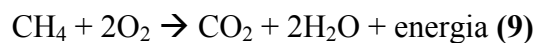
Segundo Chernicharo (1997), esta equação não considera o uso do composto orgânico biodegradável ($\text{C}_n\text{H}_a\text{O}_b\text{N}_d$) na formação de material celular ou outros fins, apenas a formação de metano.

A estimativa da produção de metano pode ser feita a partir da DQO degradada. Entretanto pode-se utilizar outro método. De acordo com Chernicharo (1997), queimando-se o metano produzido, consome-se uma quantidade de oxigênio equivalente a DQO removida. De acordo

⁷ Não se consideram as transformações relativas a cada uma das etapas independentes, mas encadeadas, que o composto pode sofrer no processo anaeróbio.

⁸ Não foi possível identificar a natureza termodinâmica da equação de Buswell.

com a fórmula (9), para cada mol de CH₄ queimado, por exemplo, consomem-se dois moles de O₂, equivalente a 64g de DQO degradada.



Abaixo, a tabela 2.10 indica as principais características dos catabolismos oxidativo e fermentativo.

Tabela 2.10: Características do catabolismo oxidativo e fermentativo

Características	Catabolismo oxidativo	Catabolismo fermentativo
Composto doador de elétron	Matéria Orgânica	Matéria orgânica oxidada
Composto aceptor de elétron	Externo: composto inorgânico (oxigênio, nitrato, sulfato)	Interno: matéria orgânica reduzida*
Estado de oxidação do carbono no composto final	(4+) *	(4+) * (4-) **

Fonte: Adaptado de von Sperling (1996, p.16).

* CO₂; ** CH₄

Em resumo, os dois tipos de catabolismos retiram a energia da matéria orgânica para suas necessidades. Esta energia é obtida na passagem do elétron de um composto para outro. Parte da energia é utilizada no crescimento dos organismos (anabolismo). O anabolismo é detalhado em seguida.

2.1.3 – Anabolismo aeróbio e anaeróbio

O crescimento da biomassa nos processos biológicos é chamado de anabolismo. Este aumento da biomassa pode ser medido a partir do aumento da concentração de sólidos em suspensão voláteis (SSV). Geralmente, a relação entre sólidos totais e sólidos voláteis para a célula bacteriana anaeróbia é de 1,14 SST/SSV, definida por Lettinga (1996, apud Chernicharo, 1997).

O crescimento bacteriano depende da disponibilidade de substrato no líquido. Pode-se utilizar a DBO e a DQO para determinar a concentração de substrato (S). Para cada organismo, existe uma determinada concentração de substrato que, para valores acima dela, a taxa de crescimento é máximo. Esta concentração é denominada de constante de saturação (K_s).

Segundo Metcalf & Eddy⁹ (1991 apud von Speling, 1996), esta constante está entre 15 e 70mgDQO/L para bactérias aeróbias. Elas crescem a uma taxa máxima ($\mu_{\text{máx}}$) de 1,2-6d⁻¹. Para van Haandel & Lettinga (1994 apud von Sperling, 1996), a constante K_s é de 200mgDQO/L para bactérias acidogênicas e 50mgDQO/L para bactérias metanogênicas. Segundo o mesmo autor, a taxa máxima é de 2d⁻¹ para bactérias acidogênicas e 0,4d⁻¹ para as metanogênicas.

Abaixo destes valores de K_s , a taxa de crescimento dos microrganismos decresce proporcionalmente à concentração de substrato. Nota-se que as taxas de crescimento máximas são menores para as bactérias anaeróbias e que os valores de K_s são menores nas aeróbias. Isto significa que as bactérias aeróbias crescem mais rapidamente e são mais eficientes em efluentes mais diluídos.

Conforme indica von Sperling (1996), o crescimento bacteriano (dX/dt) pode ser expresso em relação à concentração das próprias bactérias (X), de acordo com a fórmula (10) abaixo.

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{\text{máx}} * \frac{S}{K_s + S} * X \quad (10)$$

Von Sperling (1996) apresenta, na fórmula (11) que se segue, outra forma de expressar o crescimento bacteriano (dX/dt). Este pode ser obtido através do consumo de substrato (dS/dt). O consumo de substrato é medido subtraindo a concentração de matéria orgânica no efluente final da concentração antes do processo.

$$\frac{dX}{dt} = Y * \frac{dS}{dt} \quad (11)$$

O coeficiente de produção de biomassa (Y) é a constante que mostra a quantidade de biomassa produzida por unidade de substrato removido. Este parâmetro é de difícil determinação prática. A biomassa pode ser representada pelas unidades SS e SSV, e o substrato em DBO ou DQO. Segundo Lettinga (1994, p.27), a produção de bactérias aeróbias (Y) é de 0,45 gSSV/gDQO_{removida}. Para Orhon e Artan¹⁰ (1994, apud von Sperling 1996, p.118), o valor de Y para as bactérias aeróbias varia entre 0,3 e 0,7gSSV/gDQO_{removida}. Para bactérias anaeróbias, Y é de 0,02 gSSV/gDQO_{removida}, segundo Lettinga (1994, p.27).

⁹ METCALF & EDDY, inc. Wastewater Engineering: treatment, disposal, and reuse. 3^aed. McGraw-Hill. 2001.

¹⁰ ORHON,D. & ARTAN,N. (1994). Modeling of active sludge systems. Technomic Publishing Co, Lancaster, EUA. 589 p.

Chernicharo (1997, p.49) considera que a produção de células anaeróbias acidogênicas é de 0,12 a 0,15 gSSV/gDQO_{removida}, e de 0,015 a 0,05 gSSV/ gDQO_{removida} para bactérias anaeróbias metanogênicas. Deve-se notar que Y é menor para as bactérias anaeróbias. Isso é um reflexo da menor quantidade de energia liberada neste processo, resultando, portanto, no menor crescimento da biomassa.

3 – Tipos de ecossistemas microbiológicos

Existem diferentes grupos de microrganismos adaptados para realizarem os processos de conversão da matéria orgânica em várias condições ambientais. Nos ambientes em que a luz está presente, encontram-se organismos fotoautótrofos, como as algas, atuando paralelamente a bactérias e outros organismos quimiotróficos. Em outros ambientes com pouca luz, crescem apenas microrganismos quimiotróficos. As bactérias são os principais organismos no processo biológico de remoção de matéria orgânica. As bactérias se diferenciam pela fonte de energia, fonte de carbono, mas também pela faixa de temperatura ótima para seu crescimento.

Em relação à faixa de temperatura elas podem ser classificadas em psicrófilicas, mesófilicas e termófilicas. As faixas de temperatura referentes a cada uma destas classificações estão indicadas na tabela 2.11 abaixo.

Tabela 2.11: Classificação das bactérias quanto à faixa de temperatura

Classificação	Temperatura (°C)	
	Faixa	Ótimo
Psicrófilicas	10 a 30	12 a 18
Mesófilicas	20 a 50	25 a 40
Termófilicas	35 a 75	55 a 65

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (1991, apud von Sperling 1996)

As bactérias anaeróbias metanogênicas são representadas por dois grupos com diferentes temperaturas ótimas. Um grupo atua na faixa mesófila, entre 30°C e 35°C. O segundo grupo está na faixa termófila e está adaptado à faixa de 50°C a 55°C. Temperaturas abaixo de 20°C provocam grande redução na metanogênese. Evidentemente o dimensionamento do reator depende da temperatura do efluente, sendo que para temperaturas fora da faixa ótima os reatores deverão ter volumes maiores.

Além destas, as bactérias se diferenciam quanto à faixa de pH ótima. A maioria sobrevive em pHs menor que 9,0 e maior que 4,0. A faixa de pH neutro é a mais adequada. Segundo van

Haandel & Lettinga (1994), pHs menores que 6,3 e maiores que 7,8 provocam rápida inibição da metanogênese.

Em relação aos nutrientes, a proporção entre DQO, nitrogênio e fósforo depende do crescimento bacteriano. Para Lettinga (1996, apud Chernicharo, 1997), os organismos com crescimento de 0,05 gSSV/gDQO deve-se ter DQO:N:P igual a 1000:5:1. Caso o crescimento seja maior a demanda de nutrientes também cresce. Considerando organismos com crescimento de 0,15 gSSV/gDQO esta razão é de 350:5:1.

Compostos tóxicos para bactérias anaeróbias foram definidos por alguns autores. Speece (1986) considera que uma concentração de 170 mgH₂S/l pode ser tolerada. McCarty (apud Chernicharo) considera que concentrações de amônia livre acima de 150mg/l e de íon amônio acima de 3000 mg/l são tóxicos.

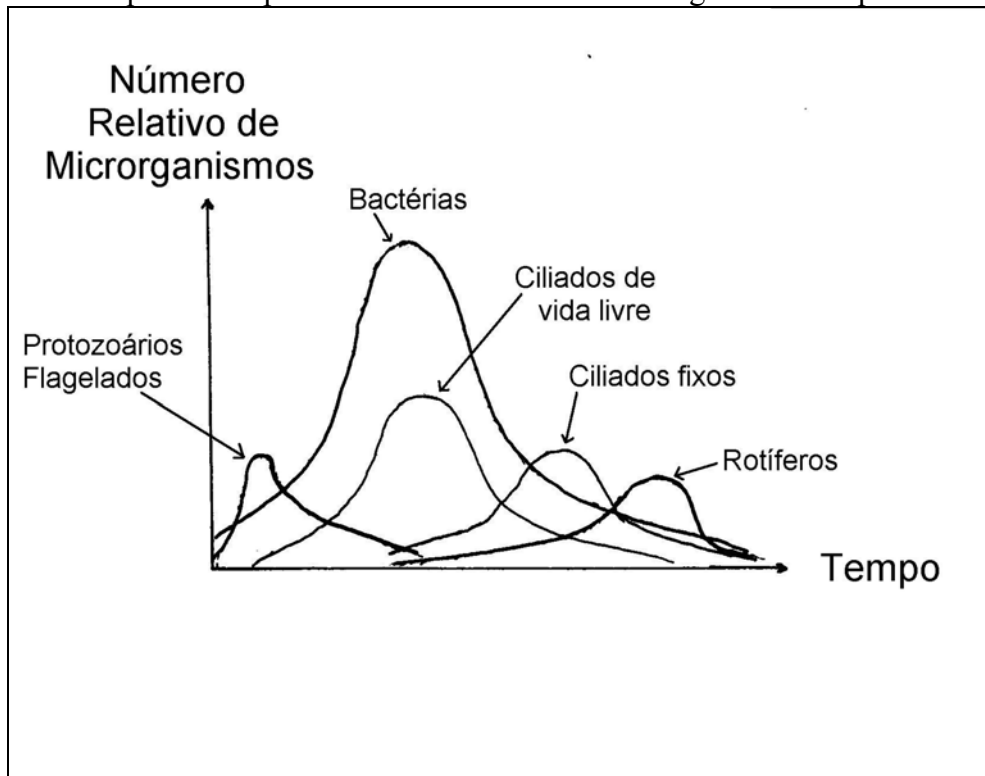
3.1 - Ecossistema aeróbio

No reator aeróbio existe uma pequena diversidade de espécies dos vários microrganismos que formam a biomassa. Todos são capazes de consumir oxigênio para o seu metabolismo, alguns são facultativos.

Segundo von Sperling (1996), os principais organismos presentes no processo biológico aeróbio são as bactérias, os fungos e os protozoários. As bactérias são os organismos de maior quantidade nos processos biológicos e representam os organismos mais importantes no processo biológico de estabilização da matéria orgânica. Elas são unicelulares e de diversos tamanhos e formas. Possuem a característica de se juntarem em flocos, biofilmes e grânulos, o que é de grande utilidade nos processos de tratamento de efluentes líquidos. Algumas bactérias podem causar doenças. Os protozoários alimentam-se de bactérias, algas e outros microrganismos. No tratamento de efluentes líquidos são essenciais para manter o equilíbrio entre os diversos grupos, principalmente pela sua atividade predatória sobre as bactérias livremente suspensas. A maioria é aeróbia estrita, alguns são facultativos e uma parcela é patogênica. Os protozoários também ajudam na formação de flocos de biomassa. Os fungos são organismos quimioheterótrofos. São organismos de grande importância na decomposição da matéria orgânica, mas para crescerem, necessitam de ambiente com baixo pH.

No tratamento aeróbio existe uma seqüência de predominância relativa de microrganismos mostrada na figura 2.1 abaixo.

Figura 2.1: Seqüência de predominância relativa de microrganismos no processo aeróbio



Fonte: Adaptado de von Sperling (1996, p.23)

Essa seqüência ocorre devido à interação ecológica na comunidade microbiana e nas mudanças e transformações do meio ao longo do processo. O aumento de um grupo de organismos é acompanhado pelo declínio de outro. Os primeiros organismos são aqueles presentes no efluente. Entretanto, estes são substituídos pelos protozoários flagelados, que são mais eficientes na competição por alimentos. A vantagem dos flagelados é a capacidade de locomoção. Na medida que a concentração de material orgânico diminui, os protozoários ciliados aparecem substituindo os flagelados, pois são capazes de sobreviver em menores concentrações de substrato. Nestas condições, além dos ciliados, as bactérias aparecem na quantidade máxima. Por fim, com a redução ainda maior na concentração de substrato, os protozoários e rotíferos consomem as bactérias. Portanto, não existe interação de ajuda mútua entre os organismos aeróbios, e sim uma competição constante por substrato, nutrientes, oxigênio e espaço.

3.2 - Ecossistema anaeróbio

O processo anaeróbio pode ser dividido em etapas. Segundo Chernicharo (1997), cada etapa é caracterizada pelo consumo de determinado tipo de composto e a produção de outro. As etapas estão encadeadas, sendo que o produto de uma é consumido pela outra, e assim sucessivamente até a estabilização total do composto. Além disso, cada etapa é realizada por

diferentes tipos de organismos com funções específicas. Apesar da especialização, estes organismos são mutuamente dependentes e o equilíbrio entre eles é bastante sensível. Basicamente pode-se separar as etapas em: fermentação hidrolítica, fermentação acidogênica, acetogênese, metanogênese e eventualmente a sulfetogênese.

Parte do substrato é facilmente degradada pelas bactérias anaeróbias. Outra parte é formada por substratos complexos, que só podem ser fermentados por organismos anaeróbios especializados. O tempo que esses microorganismos especializados necessitam para crescer é chamado “tempo de adaptação” da biomassa. A remoção efetiva de matéria orgânica ocorre na fase de metanogênese.

Segundo Chernicharo (1997), na primeira etapa ocorrem quebras dos compostos complexos em moléculas menores, em tamanhos que podem atravessar as paredes celulares. Desta forma, as bactérias fermentativas hidrolíticas excretam enzimas capazes de quebrar as ligações que formam os polímeros. Neste processo, proteínas, lipídios e carboidratos são hidrolizados.

A partir dos produtos solúveis da hidrólise, que são absorvidos e metabolizados pelas bactérias fermentativas, surgem novos produtos no meio. Chernicharo (1997) indica que além de ácidos graxos voláteis, álcoois, ácidos lácticos, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto, surgem também novas células. Os principais produtos dos organismos fermentativos são os ácidos graxos voláteis; portanto, essas são também chamadas de bactérias fermentativas acidogênicas. Na medida em que a produção de ácidos ocorre, o pH decresce. As bactérias fermentativas acidogênicas são inibidas pela diminuição do pH que elas mesmas produzem. Dependendo da concentração de íons pode-se ocorrer o azedamento do reator.

Após a acidogênese, um grupo de bactérias oxida os produtos gerados naquela etapa. As bactérias que oxidam os compostos são denominadas acetogênicas e produzem um substrato mais apropriado para as bactérias metanogênicas. De acordo com Chernicharo (1997), elas são consideradas como parte de um grupo metabólico intermediário. Seus produtos são o acetato, o hidrogênio e o gás carbônico.

A última etapa do processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos é a metanogênese. Neste complexo ecossistema, as bactérias anaeróbias metanogênicas realizam funções primordiais. Ao produzirem o metano, que na maior parte desprende para a fase gasosa, ocorre a efetiva remoção da matéria orgânica. O substrato usado por estas bactérias é limitado. Segundo Chernicharo (1997), entre os compostos usados estão o ácido acético,

hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Entretanto, devido a sua baixa taxa de crescimento e de consumo de ácidos orgânicos, estas bactérias normalmente representam o fator limitante nos processos de digestão anaeróbia. Para Chernicharo (1997), existem dois grupos principais de bactérias metanogênicas. O primeiro, e maior, são aquelas que usam o ácido acético ou metanol; e o segundo, aquelas que utilizam o hidrogênio e o dióxido de carbono para produzir metano.

O grupo das bactérias que utilizam o acetato (bactérias acetoclásticas) para formar metano é predominante. São poucas espécies capazes de utilizar o acetato. Entretanto, de acordo com Chernicharo (1997), estes microrganismos respondem por aproximadamente 60% até 70% da produção total de metano na digestão anaeróbia. Neste grupo destacam-se os organismos que pertencem ao gênero *Methanosarcina*, capazes de utilizar o acetato e o hidrogênio. A quebra do acetato em metano e gás carbônico é indicada na equação (12) abaixo.



As bactérias anaeróbias capazes de usar o hidrogênio (bactéria hidrogenotróficas) para produzir metano são responsáveis por manter a concentração de hidrogênio baixa. Praticamente todas as bactérias metanogênicas são capazes de produzir metano a partir deste composto. O aumento da concentração de hidrogênio inibe as bactérias da acidogênese, que não resistem ao pH ácido. Por outro lado, elas produzem o acetato, que é utilizado pelas bactérias metanogênicas. Portanto, existe uma interação comensal¹¹ entre os organismos anaeróbios. A síntese do metano a partir do hidrogênio é indicada na equação (13) abaixo.



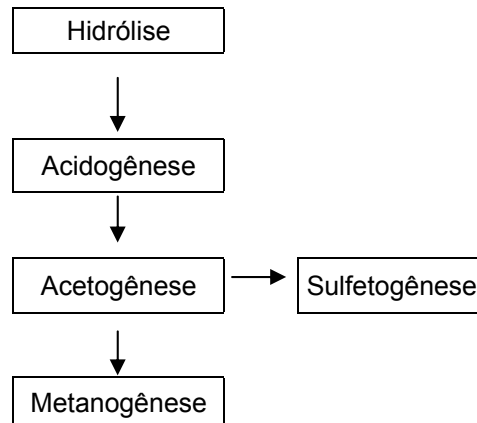
Além disto, segundo Chernicharo (1997), na presença de compostos com enxofre, surge a etapa da sulfetogênese. Nesta etapa, sulfatos (SO_4^{2-}), sulfitos (SO_3^{2-}) e outros compostos sulfurados serão reduzidos a sulfetos (H_2S) durante a oxidação de compostos orgânicos. Chernicharo considera que este é um grupo de bactéria estritamente anaeróbia, e são chamadas de bactérias redutoras de sulfato (ou bactérias sulforedutoras). Ao utilizarem compostos com enxofre, como receptores de elétrons, as bactérias sulforedutoras competem por substrato com as metanogênicas. Essas bactérias podem utilizar uma ampla variedade de substratos: todos os tipos de ácidos graxos voláteis, diversos ácidos aromáticos, hidrogênio,

¹¹ Uma associação entre organismos em que um se alimenta dos excrementos, ou sobras, do outro, mas sem causar prejuízo ao primeiro.

metanol, etanol, glicerol, açúcares, aminoácidos e vários compostos fenólicos. Por utilizarem compostos intermediários da digestão anaeróbia, elas alteram a rota do metabolismo, formando menos metano.

A figura 2.2 abaixo representa um esquema simplificado do ecossistema anaeróbio.

Figura 2.2: Esquema do ecossistema anaeróbio



Fonte: adaptado de Pauss (1987).

4 – Características dos reatores biológicos

Os reatores biológicos criam um ambiente propício para que a matéria orgânica seja utilizada pelos microrganismos. Em alguns sistemas, uma seqüência de reatores é usada para otimizar o processo. Independente do tipo de reator, e do processo biológico, é a atividade metabólica da biomassa que determina a capacidade do sistema de consumir o substrato. Portanto, um dos princípios do reator biológico é otimizar o contato entre biomassa e matéria orgânica. Além disto, os organismos transformam a matéria orgânica em produtos que podem ser removidos do líquido. A remoção destes produtos é essencial em sistemas de tratamento de efluentes líquidos. Desta forma, os reatores devem ter mecanismos de separação de sólidos, gases e líquido.

Os reatores biológicos podem ser classificados de diferentes formas. Algumas das principais características são relativas ao regime hidráulico, à quantidade de carga orgânica que pode ser absorvida e ao tipo de crescimento da biomassa. Nos processos biológicos estas características são usadas em diferentes composições tanto nos processos aeróbios quanto nos anaeróbios.

4.1 - Características hidráulicas dos reatores biológicos

Em relação ao fluxo hidráulico, von Sperling (1996) apresenta duas variáveis: fluxo contínuo e intermitente (em batelada). O primeiro se caracteriza pelo fluxo constante e igual na entrada e na saída. O segundo não tem fluxo durante o processo.

No caso do fluxo contínuo, o reator é alimentado constantemente, mas o volume total não varia. A vazão que entra (afluente) é a mesma que sai (efluente). Os processos de fluxo contínuo estão em estado pseudo-estacionário, e por isso o equilíbrio do ecossistema pode ser mantido com mais facilidade. Este tipo de fluxo é utilizado nos sistemas de tratamento de esgoto.

No caso dos reatores de batelada, o substrato é alimentado no começo e retirado após o término do processo. Segundo Pauss (1987), o processo por bateladas apresenta dificuldades maiores na sua operação. Neste caso as condições internas estão sempre se modificando e dificulta a estabilidade e o equilíbrio microbiológico. Sem equilíbrio, os diferentes grupos de organismos aeróbios e anaeróbios devem se adaptar a cada etapa do processo. Por outro lado, o processo de bateladas é o mais simples tecnologicamente e por isso pode ser preferido em alguns casos. Na digestão de esterco com palha, por exemplo, pode ser a opção mais indicada. Outro caso é quando se adiciona progressivamente sólidos orgânicos ou líquidos sobre os sólidos no reator. Os aterros sanitários são exemplos de processo de batelada, pois grandes quantidades de lixo doméstico são adicionadas diariamente e a recuperação de biogás ocorre durante um longo período.

Nos processos anaeróbios, a produção de biogás total não depende do fluxo hidráulico do reator. O volume é igual tanto para reatores de batelada quanto para reatores de fluxo contínuo. Entretanto, essa produção ocorre numa taxa constante no fluxo contínuo; e no processo por bateladas varia com o tempo, atingindo um pico e reduzindo a zero no fim do processo.

4.2 – Características de quantidade de carga orgânica absorvida

4.2.1 - Sistemas de baixas cargas orgânicas

Sistemas aeróbios de baixa carga dependem de mecanismos naturais de transferência de oxigênio da atmosfera para o meio líquido. A solubilidade do oxigênio na água é muito baixa, por isso sua concentração de saturação é pequena. Enquanto a concentração de oxigênio na

atmosfera é de 270 mg/L, na água ela fica próxima de nove mg/L, sob condições normais de temperatura (20⁰C) e pressão (101kPa). Na concentração de saturação, os fluxos de oxigênio entre líquido e gás são iguais. O valor máximo de saturação depende da temperatura e da pressão.

A difusão de oxigênio na água depende da diferença entre a concentração inicial e a concentração de saturação. Quanto maior for essa diferença, maior a velocidade de dissolução de oxigênio atmosférico para o líquido. Além disto, esta transferência depende das características hidráulicas do corpo d'água. Segundo von Sperling (1996), esta é menor em corpos d'água mais profundo, em lagoas pequenas, em rios vagarosos. A maior transferência ocorre nas corredeiras e quedas d'água. Os principais sistemas aeróbios de baixa-taxa conciliam a remoção da biomassa por organismos quimiotróficos e a produção de oxigênio por organismos fototróficos. Este tipo de ambiente é encontrado, por exemplo, em lagoas com baixa turbidez.

Os sistemas anaeróbios convencionais são caracterizados por terem baixas cargas orgânicas volumétricas. O crescimento da biomassa anaeróbia é lento, portanto, o tempo mínimo para sua permanência no reator deve ser o tempo suficiente para sua reprodução. Entretanto, esse tipo de sistema não apresenta mecanismos de retenção de sólidos. Desta maneira, nenhum líquido deve ser removido antes do tempo mínimo de reprodução da biomassa, pois o efluente final também arrasta a biomassa do reator para fora. Para garantir o crescimento dos microrganismos, manter uma população bacteriana estável e um contato maior entre a biomassa e o esgoto, seu tempo de retenção hidráulica deve ser bastante elevado. Neste caso, o tempo de retenção da biomassa será igual ao tempo de retenção hidráulica. Estes sistemas necessitam de grandes volumes para obterem o tempo de retenção hidráulica desejado. Conseqüentemente, a carga orgânica volumétrica é baixa, ou seja, a proporção de DQO afluente por m³ de reator é pequena. Entretanto, o tempo de retenção hidráulica determina o volume do reator, e quanto maior o reator, maior o seu custo. Os principais exemplos são: os digestores anaeróbios de lodo, os tanques sépticos e as lagoas anaeróbias.

Os digestores anaeróbios de lodo são usados para estabilizar o lodo de estações aeróbias de tratamento de efluentes. Também podem ser usados para estabilizar o lodo de efluentes industriais com elevada concentração de sólidos em suspensão. Devido à elevada concentração de sólidos, a etapa de hidrólise pode se tornar a limitante do processo. Para se otimizar a hidrólise deve-se considerar alguns fatores que a influenciam. Neste caso, as

temperaturas devem ser mantidas entre 25 e 35°C e o tempo de residência da biomassa deve ser suficiente para que os microrganismos de todas as fases cresçam e se multipliquem. Outros fatores como a composição da biomassa e o tamanho das partículas são menos susceptíveis ao controle. Outras configurações deste sistema incluem mecanismos de mistura e a separação em série das fases da digestão.

Além dos digestores anaeróbios, os tanques sépticos e as lagoas anaeróbias são sistemas de baixa-taxa bastante comuns. Os tanques sépticos são sistemas bastante simples e datam de 1860, mas ainda são bastante utilizados. Encontram-se principalmente em localidades, de uma ou poucas residências e em áreas de baixa declividade, para remoção dos sólidos em suspensão. Parte dos sólidos do esgoto se sedimentam no fundo, formando o lodo. Os compostos e sólidos mais leves sobem para a superfície formando a espuma. O esgoto sai pela extremidade oposta sem o material que ficou no lodo e na espuma. O material no tanque é decomposto aeróbica e anaerobicamente, produzindo metano, gás carbônico e sulfeto de hidrogênio. Apesar da decomposição anaeróbia do lodo reduzir seu volume, o excesso deve ser removido periodicamente.

As lagoas anaeróbias podem ser utilizadas em regiões de clima quente e são freqüentes no tratamento de efluentes de alta carga como os de laticínios, frigoríficos, bebidas e outros. São simples de construir e de operar. Suas dimensões são maiores que a de um tanque séptico, para a mesma carga orgânica. A remoção do lodo deve ser feita quando o volume deste atingir metade do volume útil do reator. Segundo Mendonça (1990 apud. Chernicharo, 1997, p.106), a acumulação de lodo é da ordem de 0,03 a 0,04 m³/hab.ano.¹² Essas lagoas são descobertas, podendo gerar maus odores e a proliferação de insetos. Melhorias na eficiência podem ser obtidas com a distribuição do afluente por vários pontos pelo fundo da lagoa. Com isso a lagoa se aproxima a um reator de manta de lodo, com um lodo de melhor qualidade. A tabela 2.12 mostra alguns tipos de sistemas de baixa carga, suas eficiências de remoção de DQO e SS, e seus custos de implantação e operação.

Observa-se na tabela 2.12 que o tanque séptico tem o menor requisito de área; porém, baixa eficiência. Os sistemas de infiltração são mais baratos e tem boa eficiência, porém são os que mais necessitam de área. O sistema que une Lagoas Anaeróbias com Facultativas resulta em menores requisitos de área e custos, sem perder em eficiência.

¹² Mendonça, 1990.

Tabela 2.12: Sistemas de baixa carga com eficiências de remoção de DQO e SS, e custos

Sistema	Demanda de área (m ² /hab)	Eficiência média na remoção		Custos de Implantação (R\$/hab)	Custos de Operação e manutenção (R\$/hab.ano)
		DQO (%)	SS (%)		
Lagoa facultativa	2,0 – 4,0	65-80	70-80	40-80	2,0-4,0
Lagoa anaeróbia - Lagoa facultativa	1,5 – 3,0	65-80	70-80	30-75	2,0-4,0
Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa + Lagoa de maturação	3,0 – 5,0	70-83	73-83	50-100	2,5-5,0
Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa + remoção de algas	1,7 – 3,2	75-83	> 90	50-90	3,5-6,0
Infiltração lenta	10-50	85-95	> 93	20-60	1,0-3,0
Infiltração rápida	1,0-6,0	80-93	> 93	30-70	1,5-3,5
Escoamento superficial	2,0-3,5	75-85	80-93	40-80	2,0-4,0
Terras úmidas construídas (wetlands)	3,0-5,0	75-85	87-93	50-80	2,5-4,0
Tanque séptico	0,03-0,05	25-35	55-65	30-50	1,5-2,5

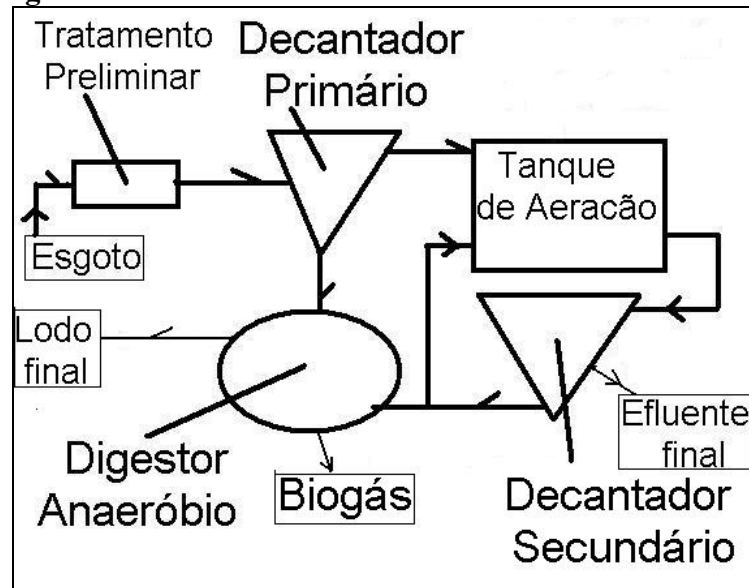
Fonte: Adaptado de von Sperling (2001), ANEXO I. US\$ 1,00 = R\$ 2,50

4.2.2 - Sistemas de alta-taxa

Os sistemas de alta-taxa apresentam mecanismos que melhoram a eficiência dos sistemas de tratamento, tanto aeróbio quanto anaeróbio.

Os sistemas aeróbios de alta-taxa são aqueles que transferem mais oxigênio ao meio líquido utilizando sistemas de aeração mecanizados. Existem várias tecnologias de aeração para criar condições ideais de oxigenação no meio líquido. Estes sistemas modernos podem tratar quase todo tipo de efluente. Entre os sistemas aeróbios de alta taxa mais utilizados está o de lodos ativados, mostrado na figura 2.3 abaixo.

No sistema de lodos ativados, apresentado por von Sperling (1997), a biomassa aeróbia entra em contato com a matéria orgânica no tanque de aeração. Neste sistema, a biomassa forma flocos que são separados do líquido no decantador secundário, etapa posterior à aeração. Parte do lodo decantado retorna para o tanque de aeração, garantido a concentração elevada de biomassa aeróbia e a elevada atividade de degradação da matéria orgânica. O lodo excedente segue para o biodigestor, onde é estabilizado.

Figura 2.3: Sistema aeróbio de lodos ativados convencional.

Fonte: adaptado de PROSAB (2001)

Com relação aos sistemas de aeração, existem duas formas principais: a aeração superficial, ou mecânica, e a aeração por ar difuso. O sistema de aeração mecânica causa um grande turbilhonamento na superfície do líquido, formando gotículas e melhorando o contato com o ar atmosférico, facilitando a transferência de oxigênio. Os aeradores mecânicos podem ser de alta ou baixa rotação. Os de alta rotação consomem mais energia, são flutuantes e tem menor custo de implantação. Os de baixa rotação consomem menos energia, possuem redutores, são fixos e tem maior custo de implantação. A tabela 2.13 apresenta a eficiência de aeração destes sistemas.

Tabela 2.13: Tipos de aeradores mecânicos

Tipo de aerador	Eficiência de oxigenação padrão
Baixa rotação, fluxo radial	1,5 a 2,2 kgO ₂ /kWh
Alta rotação, fluxo axial	1,2 a 2,0 kgO ₂ /kWh
Rotor de eixo horizontal	1,2 a 2,0 kgO ₂ /kWh

Fonte: Adaptado de PROSAB (2001, p.301)

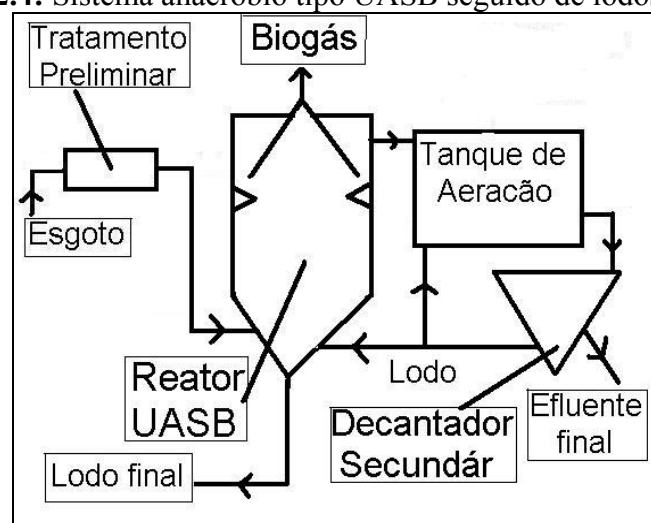
O sistema de aeração por ar difuso introduz ar ou oxigênio diretamente no líquido através de compressores e sopradores. O ar entra no líquido através de pequenos furos localizados dentro do tanque, que formam bolhas grossas ou finas. O sistema de bolhas grossas consome mais energia que o de bolhas finas e é mais simples. A eficiência de aeração destes sistemas está resumida na tabela 2.14 que se segue. O sistema de bolhas finas deve ser operado com mais cuidado, para evitar entupimentos.

Tabela 2.14: Tipos de aeradores por ar difuso

Tipo de aerador	Eficiência de oxigenação padrão
Bolhas finas	1,2 a 2,0 kgO ₂ /kWh
Bolhas médias	1,0 a 1,6 kgO ₂ /kWh
Bolhas grossas	0,6 a 1,2 kgO ₂ /kWh
Aeradores por aspiração	1,2 a 1,5 kgO ₂ /kWh

Fonte: Adaptado de PROSAB (2001, p.302)

Os sistemas de alta-taxa anaeróbios apresentam mecanismos de retenção de biomassa. O objetivo é diminuir o tempo de detenção hidráulica, mantendo as células presas o suficiente para sua proliferação. A vantagem é a considerável diminuição do volume do reator. Existem dois tipos: formação de flocos de biomassa e crescimento aderido. No primeiro, a biomassa cresce dispersa no reator formando flocos e grânulos. Exemplos desses sistemas são: os reatores de dois estágios, os de chicanas, os de manta de lodo, os de leito granular expandido e os com recirculação interna. Entre os sistemas anaeróbios de alta taxa mais utilizados está o reator de fluxo ascendente em manta de lodo, mais conhecido como reator UASB. O esquema na figura 2.4 mostra um sistema de tratamento utilizando este tipo de reator. Deve-se ressaltar que o processo anaeróbio na figura 2.4 é conjugado com um processo de lodos ativados convencional. Esta concepção será exemplificada nos estudos de caso. O segundo tipo é dos sistemas em que a biomassa cresce aderida em um suporte inerte formando um filme biológico. Exemplos de sistemas com crescimento aderido são os reatores de leito fixo, leito rotatório e leito expandido.

Figura 2.4: Sistema anaeróbio tipo UASB seguido de lodos ativados.

Fonte: adaptado de PROSAB (2001)

A comparação entre os sistemas de lodos ativados e UASB – lodos ativados é apresentada por PROSAB (2001, p.293) e adaptada na tabela 2.15 abaixo.

Tabela 2.15: Principais características dos sistemas de lodos ativados e UASB – lodos ativados no tratamento de esgotos domésticos

Item geral	Item específico	Lodos Ativados Convencional	UASB- Lodos Ativados
Idade do lodo	Idade do lodo (d)	4 a 10	6 a 10
	DBO (%)	85 a 93	83 a 93
Eficiência de Remoção**	DQO (%)	80 a 90	75 a 88
	SS (%)	87 a 93	87 a 93
	Amônia (%)	80 a 95	50 a 85
	Nitrogênio (%)	25 a 30	15 a 25
	Fósforo (%)	25 a 30	10 a 20
Área requerida**	Área (m ² /hab)	0,12 a 0,25	0,08 a 0,2
Volume total	Volume (m ³ /hab)	0,10 a 0,15	0,10 a 0,12
Energia**	Potência Instalada (W/hab)	2,5 a 4,5	1,8 a 3,5
	Consumo energético (kWh/hab.ano)	18 a 26	14 a 20
Volume de lodo a ser tratado (litros de lodo/hab.dia)		3,5 a 8,0	0,5 a 1,0
Volume de lodo a ser disposto (litros de lodo/hab.dia)		0,10 a 0,25	0,05 a 0,15
Massa de lodo a ser tratado (gST/hab.dia)***		60 a 80	20 a 30
Massa de lodo a ser disposto (gST/hab.dia)***		30 a 45	20 a 30
Custo de Implantação (R\$/hab)		100 a 160	30 a 50
Custo de Operação (R\$/hab.ano)		10 a 20	2,5 a 3,5

Fonte: Dados de PROSAB (2001, p.293)

* Inicia-se com o processo anaeróbio e finaliza com o aeróbio

** Dados de von Sperling (2001), ANEXO

*** gramas de sólidos totais por habitante por dia

De acordo com a tabela 2.15, as maiores diferenças entre os dois sistemas são: em relação à remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo), ao consumo de energia elétrica no processo, volume e massa de lodo a ser tratado e disposto e aos custos de implantação e operação. A potência instalada no sistema de lodos ativados é da ordem de 2,5W a 4,5W por habitante, e o consumo entre 18 e 26 kWh por habitante por ano. No caso do sistema UASB – lodos ativados, esse consumo é bem inferior, da ordem de 14 a 20 kWh por habitante por ano. Os custos de implantação e operação dos dois sistemas são bem diferentes, sendo que os custos do sistema UASB – lodos ativados é inferior ao sistema de lodos ativados convencional. A tabela 2.16 mostra os principais sistemas de alta-taxa, suas eficiências de remoção de DQO e SS, os requisitos de potência e energia para aeração e os custos de implantação e operação.

Tabela 2.16: Sistemas de alta-taxa, eficiências, requisitos de energia e custos.

Sistema de tratamento	Eficiência remoção DQO (%)	Potência instalada (W/hab)	Energia consumida (kWh/hab.ano)	Custo de Implantação (R\$/hab)	Custo de Operação e manutenção (R\$/hab.ano)
Lagoa aerada facultativa	65-80	1,2-2,0	11-18	50-90	5,0-9,0
Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação	65-80	1,8-2,5	16-22	50-90	5,0-9,0
Lagoa anaeróbia + Lagoa facultat. + lagoa de alta taxa	70-83	< 0,3	< 2	50-90	3,5-6,0
Reator UASB	55-70	-	-	30-50	2,5-3,5
UASB + lodos ativados	75-88	1,8-3,5	14-20	70-110	7,0-12
UASB + biofiltro aerado submeso	75-88	1,8-3,5	14-20	65-100	7,0-12
UASB + filtro anaeróbio	70-80	-	-	45-70	3,5-5,5
UASB + filtro biológico percolador de alta carga	73-88	-	-	60-90	5,0-7,5
UASB + flotação por ar dissolvido	83-90	1,0-1,5	8-12	60-90	6,0-9,0
UASB + lagoas de polimento	70-83	-	-	40-70	4,5-7,0
UASB + lagoa aerada facultativa	65-80	0,3-0,6	2-5	40-90	5,0-9,0
UASB + lagoa aerada mist. Compl. + lagoa decantação	65-80	0,5-0,9	4-8	40-90	5,0-9,0
UASB + escoamento superficial	70-85	-	-	50-90	5,0-7,0
Lodos ativados convencional	80-90	2,5-4,5	18-26	100-160	10-20
Lodos ativados – aeração prolongada	83-93	3,5-5,5	20-35	90-120	10-20
Lodos ativados – batelada (aeração prolongada)	83-93	4,5-6,0	20-35	90-120	10-20
Lodos ativados convenc. c/ remoção biológica de N	80-90	2,2-4,2	15-22	110-170	10-22
Lodos ativados convenc. c/ remoção biológica de N/P	80-90	2,2-4,2	15-22	130-190	15-25
Lodos ativados convencional + filtração terciária	90-95	2,5-4,5	18-26	130-190	15-25
Biofiltro aerado submerso com nitrificação	83-90	2,5-4,5	18-26	70-120	8-15
Biofiltro aerado submerso c/ remoção biológica de N	83-90	2,2-4,2	15-22	80-130	8-15
Filtro biológico percolador de baixa carga	80-90	-	-	120-150	10-15
Filtro biológico percolador de alta carga	70-87	-	-	120-150	10-5

Fonte: Adaptado de von Sperling (2001), ANEXO I. US\$ 1,00 = R\$ 2,50

Observa-se na tabela 2.16 que os reatores UASB são os mais baratos de implantar e operar, porém tem a menor eficiência se comparado com outros sistemas. Os sistemas com lagoas também são baratos de implantar e operar. Os reatores UASB e os Filtros Biológicos Percoladores (FBP) não necessitam de energia elétrica. Os sistemas com lodos ativados e os de FBP são mais caros de implantar e operar e estão entre os que mais consomem eletricidade. Os sistemas mais eficientes na remoção de DQO e SS são os que incluem lodos ativados ou filtros.

4.3 – Mecanismos de retenção de biomassa em reatores biológicos

Os mecanismos de retenção da biomassa no reator promovem ganhos de eficiência do reator, reduzem o volume e melhoram as características do líquido tratado. No caso de sistemas com crescimento aderido, a biomassa se prende a um meio suporte. No sistema de crescimento

disperso, mecanismos de separação por gravidade são usados para aumentar o tempo de detenção da biomassa, em forma de sólidos, no reator biológico.

4.3.1 – Sistemas com crescimento aderido

Os reatores biológicos com crescimento aderido possuem várias vantagens. A biomassa que cresce aderida necessita de menos energia para o metabolismo e pode tratar efluentes líquidos menos concentrados. Além disto, o tempo de detenção de sólidos é bastante elevado, e a biomassa, que se solta esporadicamente em flocos, tem boa sedimentação. O esgoto passa por entre o meio suporte, e a biomassa aderida no suporte remove o substrato. O tempo de detenção hidráulica é baixo, o que possibilita a construção de reatores de pequeno volume e redução do seu custo total. O elevado tempo de retenção de sólidos, junto com a elevada concentração de microrganismos, oferece boas condições para o tratamento de efluentes de baixa concentração. Segundo Chernicharo (1997, p.108), o tempo de retenção de sólidos em reatores anaeróbios de leito fixo é superior a 20 dias. Estes reatores são eficientes no tratamento de efluentes. Sua operação é simples e podem ser do tipo aeróbio ou anaeróbio.

Os reatores aeróbios com crescimento aderido necessitam de espaço extra para a oxigenação do meio suporte. Isso pode aumentar o volume final do reator em comparação com o modelo anaeróbio, além de necessitar de mecanismos que promovam a circulação interna de oxigênio. Os filtros aeróbios têm fluxo descendente e não operam afogados.

Nos reatores anaeróbios o fluxo pode ser ascendente ou descendente. Problemas de entupimento do filtro e formação de caminho preferencial podem ocorrer nos casos de reatores de fluxo ascendente. Quando o fluxo for descendente, o reator pode operar afogado ou não. Para os reatores não afogados o efluente deverá ser recirculado no reator para melhorar o processo. Outro detalhe deste tipo de reator biológico é quanto ao formato do meio suporte. O formato pode contribuir para aumentar a concentração dos microrganismos e melhorar a eficiência do processo.

Reatores com leito rotatório são outro modelo com crescimento aderido. Os microrganismos crescem aderidos em discos que giram lentamente no eixo horizontal. Estes ficam totalmente submersos no tanque por onde o esgoto flui. O movimento aumenta o contato da biomassa com o substrato. Ao girarem, as forças de cisalhamento entre os discos remove o excesso de biomassa. O tempo de detenção de sólidos é bastante elevado.

Os reatores anaeróbios de leito expandido também melhoram o contato entre o substrato e a biomassa. Nesses reatores, a biomassa forma um fino filme em torno de partículas sólidas de tamanho reduzido. O esgoto flui no sentido ascendente, se opondo à força da gravidade existente nas partículas. Este efeito cinético favorece a renovação constante do substrato para as bactérias. Este sistema não apresenta perigo de entupimento e a concentração de biomassa é bastante elevada, o que permite reduzir o tempo de detenção hidráulica do processo. Dentre este tipo de processo existem os reatores de leito expandido e de leito fluidificado. Segundo Chernicharo (1997, p.111), no reator de leito expandido, 10% do seu volume é preenchido com partículas inertes, como plásticos, areias, resinas e outros materiais, sobre as quais o biofilme cresce. O diâmetro das partículas é da ordem de 0,3 a 3,0 mm, que são pouco maiores que as utilizadas no reator de leito fluidificado. A expansão ocorre quando o fluxo ascendente do efluente atravessa o manto e fica em torno de 10 a 20% maior. Durante a operação as partículas mantêm sua posição constante em relação às outras. O efluente tem elevada redução da sua DQO e dos sólidos suspensos, pois o processo alia o efeito de filtração com uma biomassa de elevada atividade. No caso de efluentes diluídos (de 150 a 600 mgDQO/L), e baixos tempos de detenção hidráulica (de 30 a 60 minutos), a redução de DQO é da ordem de 60-70% com uma biomassa de 30 gSSV/litro de reator, aproximadamente. No reator de leito fluidificado, as partículas são menores que as do leito expandido e não mantêm posição constante no reator. A expansão varia de 30 até 100% do volume de material inerte, com elevadas cargas volumétricas da ordem de 20 a 30 kgDQO/m³.d, e eficiência de 70 a 90% na remoção de DQO. A tabela 2.17 resume alguns dos principais sistemas de tratamento de esgoto com crescimento aderido. São apresentados valores de demanda de área para implantação, eficiência de remoção de DQO e SS, produção de lodo, potência e energia para aeração, custos de implantação e operação.

Tabela 2.17: Parâmetros de sistemas de tratamento de esgoto com crescimento aderido: eficiência, volume de lodo e energia.

Sistema	Eficiência na remoção DQO (%)	Volume de lodo líquido a ser tratado (l/hab.ano)	Volume de lodo desidratado a ser disposto (litros/hab.ano)	Potência instalada (W/hab)	Energia consumida (kWh/hab.ano)
Infiltração lenta	85-95	na.	na.	na.	na.
Infiltração rápida	80-93	na.	na.	na.	na.
Escoamento superficial	75-85	na.	na.	na.	na.
Terras úmidas construídas (wetlands)	75-85	na.	na.	na.	na.
Filtro biológico percolador de baixa carga	80-90	360-1100	35-80	na.	na.
Filtro biológico percolador de alta carga	70-87	500-1900	35-80	na.	na.
Biofiltro aerado submerso com nitrificação	83-90	1100-3000	35-90	2,5-4,5	18-26
Biofiltro aerado submerso c/ remoção biológica de N	83-90	1100-3000	35-90	2,2-4,2	15-22
Tanque séptico + biodisco	83-90	330-1500	20-75	na.	na.

na.: não aplica

Fonte: Adaptado de von Sperling (2001), ANEXO I.

Observa-se na tabela 2.17 a maior produção de lodo nos filtros, em especial em sistemas com processo aeróbio. A demanda de energia nos biofiltros aerados está ligada ao processo aeróbio e às características de alta-taxa. Os sistemas de infiltração, escoamento e terras úmidas também apresentam mecanismos de retenção de biomassa. São sistemas simples, de baixa taxa, mas com maiores requisitos de área.

4.3.2 – Sistemas com crescimento disperso e recirculação de lodo

Nos reatores com crescimento disperso, a biomassa está pulverizada no líquido. Estes reatores devem ter mecanismos de mistura para possibilitar a dispersão da biomassa. Esta mistura melhora o contato da biomassa com a matéria orgânica, possibilitando o consumo do substrato. Entretanto, a mistura intensa dificulta a sedimentação da biomassa. A biomassa é arrastada para fora do reator junto com o efluente. Dois mecanismos de retenção de biomassa são usados em conjunto. Um se baseia na recirculação do lodo e o outro na capacidade de sedimentação da biomassa.

A recirculação do lodo é usada em reatores com crescimento disperso. Este mecanismo aumenta a concentração de biomassa no reator e reduz o tempo de detenção hidráulica. O efluente sai do reator de crescimento disperso e segue para um tanque de sedimentação. A concentração de biomassa no efluente é elevada, ou seja, os microrganismos são levados

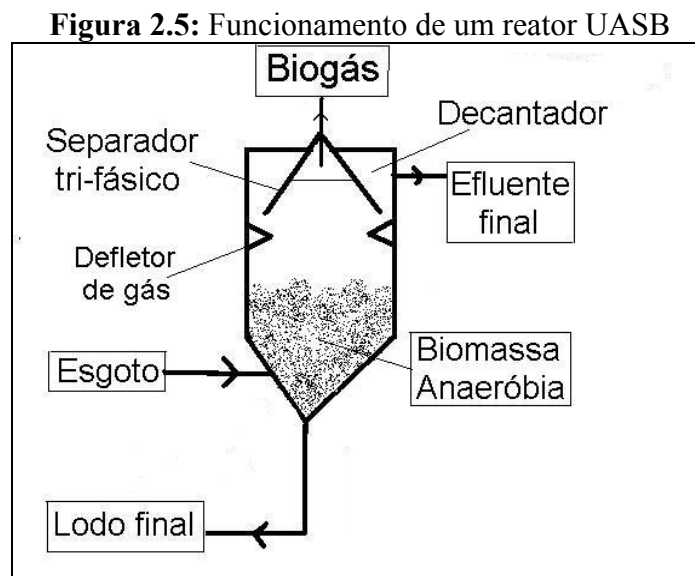
juntos com o efluente final. Na sedimentação, a biomassa se separa do líquido formando um lodo. Este lodo tem elevada concentração de microrganismos e é recirculado para o reator biológico, melhorando a eficiência do processo. A recirculação necessita de bombeamento do lodo e, conseqüentemente, consome energia elétrica.

Nos reatores aeróbios de crescimento disperso o próprio mecanismo de aeração garante a suspensão da biomassa. Neste processo, a separação da biomassa é feita num tanque de sedimentação separado. A recirculação do lodo é feita por bombeado. Além do consumo de eletricidade na aeração, o sistema aeróbio necessita de eletricidade no bombeamento do lodo. Este processo é característico do sistema de lodos ativados. Entretanto, o sistema anaeróbio de dois estágios se baseia no mesmo princípio. Este sistema é formado por um tanque anaeróbio de mistura completa seguido de um decantador. Este separa os flocos e os sólidos para serem retornados ao reator de primeiro estágio e misturados com o esgoto afluente. Já o tanque anaeróbio, concentra a biomassa ativa e mistura ao esgoto para maior contato entre os microrganismos e o substrato. Entretanto, são freqüentes os problemas no decantador, devido à formação de gás, que arrasta os flocos para cima, dificultando a sedimentação.

Nos processos anaeróbios modernos a mistura e a sedimentação estão acopladas no mesmo reator. Estes reatores se beneficiam do próprio fluxo hidráulico para misturar a biomassa e o substrato. O efluente entra pelo fundo do reator causando a mistura inicial com a biomassa que está no fundo. O efluente sai pela parte superior do reator, forçando um fluxo ascendente do líquido. Ao atravessar a manta de lodo, a biomassa remove a matéria orgânica do efluente. Além do fluxo do líquido, a formação de bolhas também ajuda na mistura interna do reator. Ao se desprenderem do lodo, as bolhas arrastam a biomassa para o alto. Os fluxos ascendentes de líquido e gás provêm a expansão do lodo no interior do reator. A biomassa se agrega em flocos, ou até em grânulos, que sedimentam mais rapidamente. Esta sedimentação permite um fluxo maior de líquido e diminui o arraste de biomassa para fora do reator. A separação entre biomassa, gás e líquido é feita na parte superior do reator. O separador trifásico remove o gás e a espuma presos na sua parte inferior. O líquido segue para a parte superior arrastando parte da biomassa. Nesta etapa a vazão diminui, possibilitando a sedimentação da biomassa, que retorna ao reator por gravidade. Este sistema contribui para redução do tempo de detenção hidráulica.

O sistema de fluxo ascendente e manta de lodo teve sua aplicação inicial na Holanda. Alguns autores denominam este tipo de reator por Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), outros

denominam de Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA). Neste sistema, o esgoto percorre o reator do fundo para o alto, atravessando uma manta de lodo densa e com elevada atividade¹³. Segundo von Sperling (2001), a eficiência teórica de remoção de DQO nos reatores UASB varia de 55 a 70%. O esquema de funcionamento do reator UASB pode ser visto na figura 2.5 abaixo.



Fonte: adaptado de Chernicharo (1997)

Próximo ao fundo encontra-se um lodo mais denso, formado por grânulos de sedimentação rápida, denominado leito de lodo. Chernicharo (1997, p.116) considera que a concentração de sólidos totais deste lodo mais denso está na ordem de 40 a 100 gST/L. Acima deste está o lodo mais diluído, denominado manta de lodo. O lodo adaptado cresce ao longo do tempo formando grânulos, enquanto o lodo menos adequado é descartado. Por esta razão, a partida do reator deve levar em conta a inoculação de um lodo de boa qualidade ou ser cultivado no seu interior. O efluente sobe, atravessando o lodo. No processo forma-se biogás. O biogás é recolhido pelo separador tri-fásico: gás, líquido e sólido. O líquido entra para o decantador, onde se separam os sólidos arrastados. O biogás é impedido de entrar no decantador pelos defletores. O efluente sai pela parte superior do decantador.

Este sistema não necessita de nenhum equipamento sofisticado e seu projeto é bastante simples. Não se utiliza mistura mecânica no reator, pois esta pode dificultar a formação de grânulos. A formação de grânulos e flocos é essencial para o funcionamento adequado do reator, pois se sedimentam rapidamente e são formados por biomassa de elevada atividade. Segundo Chernicharo (1997, p.116), os grânulos e flocos têm tamanho entre 1 e 5 mm.

¹³ São as bactérias que conseguem utilizar mais substrato no menor tempo

Durante a operação, parte do lodo deve ser descartado periodicamente. Segundo von Sperling (2001), a produção líquida de lodo nestes reatores varia de 70 a 220 litros/hab.ano. Este lodo é desidratado, geralmente em leitos de secagem ao ar livre. Após a desidratação forma-se entre 10 e 35 litros/hab.ano. Além disso, o reator UASB pode ser utilizado tanto para o tratamento de efluentes com elevada carga orgânica, como os industriais, quanto em tratamento de esgoto de baixa concentração (de pequena ou grande escala).

Algumas modificações nos reatores de fluxo ascendente e manta de lodo podem produzir efeitos que melhoram a eficiência no tratamento de certos efluentes. No caso dos reatores de leito granular expandido, o fluxo ascendente é bem maior. Isso resulta na maior expansão da manta de lodo e no aumento do volume de grânulos. Desta forma, compostos dissolvidos podem ser removidos com mais eficiência. Outra variável é o reator com recirculação interna. Este sistema trata efluente com elevada carga orgânica. Seu sistema de separação sólido, líquido e gás é mais eficiente e a mistura da biomassa com o substrato é mais intensa.

Outro exemplo de reator anaeróbico é o de chicanas. Neste sistema várias câmaras são postas em série. Cada uma se assemelha individualmente a um tanque séptico. O efluente entra pelo fundo da câmara e é coletado no alto, forçando um fluxo ascendente. A movimentação do líquido de baixo para cima garante um maior contato deste com a biomassa que fica depositada no fundo do tanque. Este sistema pode ser bastante apropriado em pequena escala, com baixa variação da vazão afluyente, para garantir a qualidade do efluente final e reduzir custo de implantação. Campos, que estuda reatores UASB, (1994 apud Chernicharo, 1997, p.114) apresenta suas principais vantagens, sem a necessidade de construir um coletor de gases e conseqüentemente com menores profundidades. Entretanto, este sistema não comporta grandes variações de vazão e ocorrências de picos excessivos, pois, devido as suas características de projeto, não existe sistema de retenção da biomassa, que pode ser arrastada para o efluente do processo. Para Campos (1994 apud Chernicharo, 1997, p.115) o tempo de detenção hidráulica desses sistemas, no projeto, deve ser entre 12 e 24 horas e a profundidade varia de 2,5 a 3,5 metros.

Tabela 2.18: Parâmetros de sistemas de tratamento de esgoto com crescimento disperso e recirculação: eficiência, volume de lodo e energia.

Sistema	Eficiência média na remoção DQO(%)	Volume de lodo líquido a ser tratado (l/hab.ano)	Volume de lodo desidratado a ser disposto (litros/hab.ano)	Potência instalada (W/hab)	Energia consumida (kWh/ hab.ano)
Reator UASB	55-70	70-220	10-35	na.	na.
UASB + lodos ativados	75-88	180-400	15-60	1,8-3,5	14-20
UASB + flotação por ar dissolvido	83-90	300-470	25-75	1,0-1,5	8-12
UASB + lagoas de polimento	70-83	150-250	10-35	na.	na.
UASB + lagoa aerada facultativa	65-80	150-300	15-50	0,3-0,6	2-5
UASB + lagoa aerada mistura completa + lagoa decantação	65-80	150-300	15-50	0,5-0,9	4-8
UASB + escoamento superficial	70-85	70-220	10-35	na.	na.
UASB + biofiltro aerado submerso	75-88	180-400	15-55	1,8-3,5	14-20
UASB + filtro anaeróbio	70-80	150-300	10-50	na.	na.
UASB + filtro biológico percolador de alta carga	73-88	180-400	15-55	na.	na.
Lodos ativados convencional	80-90	1100-3000	35-90	2,5-4,5	18-26
Lodos ativados - aeração prolongada	83-93	1200-2000	40-105	3,5-5,5	20-35
Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)	83-93	1200-2000	40-105	4,5-6,0	20-35
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N	80-90	1100-3000	35-90	2,2-4,2	15-22
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	80-90	1100-3000	35-90	2,2-4,2	15-22
Lodos ativados convencional + filtração terciária	90-95	1200-3100	40-100	2,5-4,5	18-26

na.: não aplica

Fonte: Adaptado de von Sperling (2001), ANEXO I.

Observa-se na tabela 2.18 que os sistemas com lodos ativados consomem maior quantidade de energia elétrica, necessária para a aeração. Os reatores UASB não necessitam de eletricidade, entretanto, quando estão associados a sistemas aeróbios, podem demandar energia elétrica. Além disso, os sistemas de lodos ativados produzem uma quantidade de lodo bem maior que a dos sistemas com reatores UASB. Porém, a eficiência de remoção de DQO no processo aeróbio é maior que nos reatores UASB.

5 – Consumo de energia nos sistemas de tratamento

O consumo de energia ocorre na construção e na operação do sistema. Durante a construção, gasta-se energia nas diversas etapas da execução da obra: terraplanagem, concretagem, transporte de material. Na operação do processo, utiliza-se energia nos equipamentos elétricos, para o bombeamento, para a aeração e no transporte de lodo para recirculação e destinação final.

Independente do tipo de processo biológico, o consumo de energia elétrica pode ser bastante significativo, principalmente no bombeamento de esgoto em estações elevatórias de chegada. Dependendo das condições topográficas, o esgoto deve ser bombeado vários metros para chegar até a estação de tratamento. Portanto, o gasto de energia elétrica com bombeamento deve ser avaliado em cada caso. Geralmente este valor não está discriminado dos outros consumos elétricos de uma ETE. O consumo com bombeamento depende da vazão de esgoto que chega na ETE e da altura manométrica do bombeamento. Outra dificuldade para determinar o consumo elétrico com o bombeamento é que ele, em geral, varia ao longo do dia. A vazão de esgoto que chega na ETE depende do uso da água e do tempo que leva para chegar até a ETE. Na maioria dos casos, os sistemas com redes de coleta menores têm a amplitude entre vazão mínima e máxima maior, se comparado com sistemas com uma rede de coleta extensa. O dimensionamento das bombas é feito para a vazão de pico, pois não se armazena esgoto para regularizar a vazão. Portanto, a potência das bombas da elevatória depende das características da rede e independe do tipo de sistema de tratamento.

Uma grande quantidade de lodo é produzida nos processos aeróbios e anaeróbios. Este lodo é formado por material orgânico. A energia química do lodo é de difícil utilização. A porcentagem de água no lodo é muito significativa, e ele deve ser desidratado antes de ser disposto. Mesmo após a desidratação ainda resta um volume considerável de lodo. Segundo David (2002), este grande volume deve ser transportado para disposição em aterros ou utilização no solo como fertilizante. Entretanto, a escassez de áreas próximas aos centros urbanos cria a necessidade de grandes deslocamentos para transportar o lodo ao seu destino. Conseqüentemente, consome-se também uma significativa quantidade de energia neste transporte.

6 - Consumo e geração de energia nos processos biológicos

Os processos de tratamento de efluentes líquidos consomem energia química da matéria orgânica. Segundo van Haandel & Lettinga (1994, p.26), o conteúdo energético médio da matéria orgânica presente no esgoto é de 3,3 kcal/gDQO. Portanto, cada kg de DQO contém aproximadamente 3.300kcal.

O processo anaeróbio produz metano. O metano contém um elevado poder calorífico e pode ser usado como combustível. Entretanto, a recuperação dele depende da existência de mecanismos específicos¹⁴ no reator.

6.1 – Energia no processo aeróbio

O processo aeróbio necessita de oxigênio para o catabolismo celular. Quando a concentração de oxigênio no meio líquido está abaixo do valor de saturação, este é fornecido naturalmente pelo ar atmosférico. Este é o caso dos sistemas aeróbios de baixa carga. Entretanto, segundo von Sperling (1996), em diversos tipos de sistemas de tratamento aeróbio, o fornecimento de oxigênio é feito com auxílio de sistemas mecânicos. Neste caso, a dissolução de oxigênio é realizada numa taxa superior a natural e a demanda dos microorganismos é sempre suprida. Segundo von Sperling (1996), a difusão de oxigênio pode ser molecular ou turbulenta. A difusão turbulenta é a mais eficiente. Três fatores influenciam na transferência de oxigênio: a temperatura do líquido, a concentração inicial de oxigênio no líquido e as características do efluente líquido e do reator. A partir destas variáveis, pode-se calcular a taxa de transferência de oxigênio para o líquido. Em sistemas de lodos ativados, o lodo é separado do líquido por decantação. Esta decantação ocorre em outro reator e o lodo deve ser bombeado novamente ao tanque de aeração para manter a elevada concentração de biomassa. Este é o sistema de recirculação de lodo e que demanda eletricidade para as suas bombas.

6.1.1- Consumo de energia no reator aeróbio

Para acelerar o processo natural de difusão, ou seja, aumentar a taxa de transferência de oxigênio para o meio líquido, utiliza-se sistemas de aeração artificiais. Os tipos de aeradores mais comuns para este fim são os que aplicam o processo de aeração por ar difuso e os de aeração mecânica ou superficial. Os aeradores por ar difuso introduzem ar ou oxigênio no líquido. Segundo von Sperling (1996), os aeradores mecânicos formam um turbilhamento no líquido para criar dois efeitos. Um efeito é a formação de uma maior área de contato entre o líquido e o ar, que facilita a transferência de oxigênio. O outro é de criação de um movimento caótico entre líquido e ar, que melhora a eficiência dos processos de dissolução, de mistura e de contato entre biomassa e matéria orgânica.

Von Sperlin (1996) apresenta métodos para calcular a taxa de consumo de oxigênio no sistema biológico aeróbio. Van Haandel & Lettinga (1994) consideram que a quantidade

¹⁴ Separadores tri-fásicos, selos d'água e tanques impermeáveis.

teórica mínima de oxigênio para a sobrevivência dos organismos aeróbios é de 1/3 da DQO. Entretanto, ele diz que na prática esta demanda será sempre maior devido à respiração endógena destes organismos. Dependendo das condições de operação do sistema, para cada kg de DQO adiciona-se entre 0,5 e 0,75 kg de O₂. Logo, para um fluxo de substrato de um kg de DQO/dia, deve-se adicionar de 0,5 a 0,75 kg de O₂/dia. A demanda de O₂ pelas bactérias se diferencia entre consumo para síntese celular e para respiração endógena. Segundo von Sperling (1997), para a síntese, as bactérias necessitam de cerca de 0,61 kgO₂/kgDBO₅ removido, e a demanda para respiração endógena é de aproximadamente 1,42 kgO₂/kgSSV destruído.

De acordo com von Sperling (1996), o nitrogênio presente no substrato também exerce um consumo de oxigênio no processo de nitrificação, conforme indicado na equação (2) do item 2.1. A demanda nitrogenada é de cerca de 4 kgO₂ para cada kg de amônia (NH₃) oxidada. A concentração de amônia nos efluentes domésticos fica entre 20 e 40mg/L, e de nitrogênio orgânico de 15 a 30mg/L. Por outro lado, a desnitrificação produz oxigênio a uma fração de 2,85kgO₂ por kgNO₃⁻ reduzido. A reação de desnitrificação é mostrada na equação (3) do item 2.1.

A taxa de transferência de oxigênio deve ser igual ou maior que o consumo. Os diversos tipos de sistemas de aeração e suas respectivas eficiências de oxigenação foram listados nas tabelas 2.12 e 2.13 do item 4.2.2. Segundo von Sperling (1996), com base na taxa de consumo de oxigênio e na eficiência de oxigenação dos sistemas de aeração, pode-se calcular a potência requerida para fornecer oxigênio suficiente para o processo. Conforme listada nas tabelas 2.12 e 2.13, a eficiência de oxigenação teórica dos aeradores mecânicos está na faixa de 1,2 e 2,2 kgO₂/kWh, e dos aeradores por ar difuso entre 0,6 e 2,0 kgO₂/kWh. Considerando, como exemplo, um consumo médio dos aeradores de cerca de 1kWh para adicionar 1kg de O₂ da atmosfera para o meio líquido, a potência utilizada é de 42 W. Ou então, para um fluxo de substrato de 1 kg de DQO/d, deve-se transferir de 0,5 a 0,75 kg de O₂/dia e utilizar entre 20 e 30 W.

Além da necessidade de oxigenação do efluente líquido no processo aeróbio, a maioria destes sistemas necessita de mecanismos para misturar o líquido com a finalidade de manter a biomassa sedimentável em suspensão. Para atingir este objetivo, aplica-se uma potência, por unidade de volume de reator, suficiente para impedir a sedimentação da biomassa. A concentração da biomassa é indicada em termos de sólidos em suspensão (SS). Segundo von

Sperling (1996), a unidade que representa esta relação é chamada de densidade de potência, apresentada na fórmula (13) a seguir.

$$\text{Densidade de Potência (W/m}^3\text{)} = \frac{\text{Potência Introduzida (W)}}{\text{Volume do reator (m}^3\text{)}} \quad (13)$$

Quanto maior a densidade de potência, maior a quantidade de sólidos que pode ser mantida em suspensão por volume de reator. Algumas relações entre densidade de potência e concentração de sólidos em suspensão são apresentadas na tabela 2.19.

Tabela 2.19: Relação de densidade de potência com a concentração de sólidos que podem ser mantidas em suspensão.

Densidade de potência (W/m ³)	SS (mg/L)
0,75	50
1,75	175
2,75	300

Fonte: Adaptado de von Sperling (1996, p.197)

Segundo von Sperling (1996), em sistemas aeróbios por lodos ativados a densidade de potência deve ser superior a 10 W/m³, devido a maior concentração de sólidos em suspensão no reator.

6.1.2- Consumo de energia da matéria orgânica

Além de consumir energia elétrica nos aeradores, o processo aeróbio libera uma grande parte da energia química dos compostos orgânicos do efluente durante o metabolismo oxidativo. A energia contida em compostos orgânicos encontrados nos efluentes foi apresentada por van Haandel & Lettinga (1994), e está indicada na tabela 2.20. No final do processo aeróbio o carbono presente nestes compostos se transforma em gás carbônico ou biomassa. Pode-se concluir que, no caso do CO₂, toda energia química inicial terá sido liberada. O CO₂ não pode ser oxidado, pois seu estado de oxidação é o maior possível para o carbono.

A tabela 2.20 lista alguns compostos orgânicos encontrados em efluentes líquidos domésticos. Estes são passíveis de degradação aeróbia e anaeróbia. A segunda coluna indica a relação entre a DQO equivalente para oxidar uma unidade de massa de composto (em gramas). A terceira coluna apresenta o valor da energia livre por mol de composto. A energia livre refere-se à energia liberada durante a oxidação do composto orgânico. Esta energia é o poder

calorífico do composto. A quarta coluna foi apresentada para facilitar a transformação dos compostos entre a unidade de DQO equivalente para a unidade molar. Ou seja, corresponde à quantidade de DQO consumida para oxidar 1 mol de cada composto. Já a quinta coluna é obtida dividindo-se a terceira pela quarta coluna. Ela é bastante informativa; pois, pode-se retirar a energia contida de cada composto em termos de DQO.

Tabela 2.20: Energia livre em compostos orgânicos.

Composto	gDQO/gComposto	kcal/molComposto	gDQO /molComposto	kcal/gDQO
Ácido oxálico	0,18	82	16	5,13
Ácido fórmico	0,35	68	16	4,29
Ácido cítrico	0,75	916	144	3,58
glicose	1,07	686	192	3,57
Ácido láctico	1,07	326	96	3,39
Ácido acético	1,07	207	64	3,23
glicerina	1,22	387	112	3,45
Fenol	2,38	723	224	3,22
benzeno	3,08	761	240	3,17
acetona	2,21	410	128	3,2
Etileno	3,43	314	96	3,27
Etanol	2,09	312	96	3,25
metanol	1,50	165	48	3,44
Etano	3,73	344	112	3,07
metano	4,00	191	64	2,98

Fonte: Adaptado de van Haandel & Lettinga (1994, p.21)

Pode-se notar na quinta coluna que, com exceção dos dois primeiros compostos, a relação entre kcal e gDQO dos compostos orgânicos está próxima de 3,3 kcal/gDQO. Segundo van Haandel & Lettinga (1994, p.26), esta é a média de energia livre liberada na oxidação completa dos compostos orgânicos. Nota-se também que o metano contém uma quantidade de energia inferior, em termos de kcal/gDQO em relação aos outros compostos, mas bem próxima.

6.1.3- Produção de lodo e biogás no processo aeróbio

A energia química do lodo aeróbio pode ser recuperada em forma de metano. A produção de biogás nos sistemas aeróbios ocorre apenas na etapa de digestão anaeróbia. O lodo do processo aeróbio precisa ser estabilizado. Ele é considerado como composto orgânico complexo, portanto de difícil decomposição. A quantidade de lodo produzido depende do crescimento dos organismos aeróbios. A formação de material celular pode ser medida em

termos de sólidos em suspensão voláteis (SSV) gerados por quantidade de DQO removida. Para van Haandel & Lettinga (1994, p.27), nos processos que utilizam oxigênio e nitrato, esta formação é da ordem de 0,45 gSSV/gDQO. A determinação da porcentagem de DQO catabolizada utiliza um fator de correção. Com este fator pode-se determinar qual é a DQO de 1 kg de SSV de organismo. De acordo com Speece and McCarty (1964 apud van Haandel & Lettinga 1994, p.28), este fator de correção é igual a 1,48. Multiplicando-se o fator de correção pelo fator de formação de matéria celular, que é de 0,45 gSSV/gDQO, obtém-se 0,67. Segundo van Haandel & Lettinga (1994), 67% da DQO metabolizada na respiração aeróbia se transforma em material celular e os outros 33% se transformam em CO₂. Logo, um kg de DQO metabolizada aerobiamente produzirá 450g de SSV.

Segundo David (2002, p.19), o lodo bruto do sistema aeróbio de lodos ativados possui em torno de 70% de sólidos voláteis e 30% de sólidos fixos. Logo, calcula-se que um kg de DQO metabolizada produzirá 643g de SST. Com este resultado obtém-se a relação entre SST e SSV de 1,42.

Os sólidos voláteis do lodo aeróbio são passíveis de bioconversão anaeróbia. Para Alem Sobrinho (2001, apud David, 2002, p.08), um processo de lodos ativados convencional produz de 65 a 75 gSST/hab.dia de lodo não estabilizado. Se este for digerido, reduzirá para 35 a 40 gSST/hab.dia de lodo. Segundo David (2002), após o processo de digestão anaeróbia de 100 kg de lodo bruto, 30kg transformam-se em biogás, 40kg em sólidos voláteis e 30kg permanecem nos sólidos fixos iniciais. Ou seja, para cada kg de DQO convertida em biomassa, calcula-se que apenas 193g de SSV se transformam em biogás após a digestão anaeróbia. Ou seja, 42% dos sólidos voláteis serão convertidos em biogás. Logo, a digestão anaeróbia reduz significativamente o volume do lodo.

Segundo Metcalf & Eddy (1991 apud David 2002, p.19), para cada kg de sólidos em suspensão voláteis destruídos forma-se entre 0,75 e 1,12 m³ de biogás. Além disto, entre 30 e 50% dos SSV são destruídos na digestão anaeróbia. Logo, durante a digestão anaeróbia de 100kg de lodo bruto, forma-se entre 22,5 e 33,6 m³ de biogás. Portanto, calcula-se que cada kg de DQO_{afluente} produz 643g de SST, e que destes, 193 gramas de SSV se transformarão em 145 a 216 litros de biogás. Segundo David (2002), a concentração de metano no biogás resultante da digestão anaeróbia de lodo aeróbio fica entre 60 e 70%, com poder calorífico entre 21.000 e 25.000 kJ/m³.

Portanto, no caso do lodo do processo aeróbio, pode-se recuperar parte da energia química contida nele, através da digestão anaeróbia e com produção de metano. Segundo Paus (1987), os microrganismos do biodigestor podem sobreviver um longo período sem serem alimentados. O decréscimo da produção de biogás, após o término da alimentação, depende da presença de compostos de difícil degradação no líquido, e pode levar até alguns dias. Eles começam a produzir biogás poucas horas após sua alimentação com matéria orgânica. Desta forma, a produção contínua de biogás no processo depende da introdução de carga orgânica no reator. Portanto, a produção de biogás pode ser adaptada às necessidades energéticas.

6.2 – Energia no processo anaeróbio

6.2.1- Consumo de energia no reator anaeróbio

O processo anaeróbio pode funcionar sem a necessidade de equipamentos que produzem turbilhonamento no reator. O contato entre a biomassa e a matéria orgânica pode ser forçando o efluente a atravessar o lodo. Isto ocorre a partir do movimento ascendente do líquido contrapondo ao movimento descendente de sedimentação dos grânulos de biomassa. Um gradiente hidráulico é suficiente para forçar o movimento do líquido pelo reator. Outra forma de mistura no reator é causada pelo movimento ascendente do biogás gerado no processo.

6.2.2- Consumo de energia da matéria orgânica

Uma pequena parte da energia química dos compostos orgânicos do efluente é liberada durante o metabolismo fermentativo. Observa-se a terceira coluna da tabela 2.20, o poder calorífico de vários compostos orgânicos. O poder calorífico do ácido acético, por exemplo, é de 207kcal/mol. A fermentação do ácido acético produz metano. O metano tem poder calorífico de 191kcal/mol. Segundo van Haandel & Lettinga(1994), a diferença equivale à energia livre liberada no processo. Ou seja, de 207kcal/mol, apenas 16kcal/mol de energia livre foram usadas no processo. Isso representa aproximadamente 8% da energia livre inicial do composto orgânico.

Considerando a relação entre DQO do composto e o seu poder calorífico nota-se que a diferença entre a energia contida no metano e em outros compostos é próxima. Observa-se na quinta coluna da tabela 2.20 que, com exceção dos dois primeiros compostos, a relação entre kcal e gDQO dos compostos orgânicos está próxima de 3,3 kcal/gDQO. Nota-se também que o metano contém 2,98 kcal/gDQO. Esta é uma quantidade de energia inferior, em termos de kcal/gDQO em relação aos outros compostos, mas bem próxima. Segundo van Haandel &

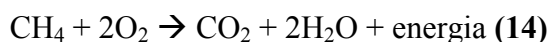
Lettinga (1994), a perda de energia no processo anaeróbio é a diferença do produto final com o inicial. Portanto, a perda de energia calculada é de 0,32 kcal/gDQO.

6.2.3- Produção de lodo e biogás no processo anaeróbio

A produção de metano pode ser determinada pelo crescimento da biomassa ou pelo consumo de matéria orgânica. No catabolismo os microrganismos consomem a DQO do líquido. O crescimento dos organismos anaeróbios é mais lento que o aeróbio. Segundo van Haandel & Lettinga (1994), devido ao baixo crescimento dos organismos anaeróbios, uma grande parte da DQO metabolizada se transforma em metano.

Van Haandel & Lettinga (1994) descrevem que a digestão de um kgDQO/d de matéria orgânica produzirá 1000 gDQO_{CH₄}/d. Porém, 3% desta DQO_{CH₄} se converte em material celular. O restante da DQO_{CH₄} representa a parcela da DQO biodegradável que foi convertida em CH₄. Deve-se lembrar, ainda, que parte da DQO afluente sai junto ao efluente do processo anaeróbio sem ser metabolizada, e que em geral esta eficiência é de 80%. A porcentagem de DQO digerida depende: do sistema, da biomassa e da biodegradabilidade da matéria orgânica. Conforme a tabela 2.20, a queima de um grama de DQO_{CH₄} gera 2,98 kcal de energia. Logo, calcula-se que 2,98kcal/g x 970g/dia = 2900 kcal/dia. Isto equivale a uma potência de 140 W ou 15,2 mol de CH₄/dia. Esta é a energia teórica máxima que poderia ser recuperada num processo anaeróbio. Porém, no caso dos reatores de baixo TDH, parte deste metano não escapa do líquido, permanecendo dissolvido e saindo junto ao efluente do processo. Este pode ser considerado o caso dos reatores UASB. Considerando que um mol de gás a 23°C tem um volume de 24,3 litros, 15,2 mol de CH₄/dia equivalem a 370 litros. Considerando que 70% do metano do processo anaeróbio é recuperado no biogás, ou seja, 10,6 mol de CH₄, calcula-se o volume deste gás em 10,6 x 24,3L/mol = 260 litros de metano. Esta energia convertida em eletricidade pode gerar 30 W, com eficiência de 30% na conversão. Em outras palavras, com um fluxo de biomassa de um kg de DQO/dia pode-se gerar 840 Wh/dia de eletricidade.

Além da estimativa de produção de metano em relação a DQO degradada, pode-se fazer isso a partir da combustão do metano produzido. Ao queimá-lo, consome-se uma quantidade de oxigênio equivalente a DQO removida. De acordo com a fórmula (14), para cada mol de CH₄ queimado, por exemplo, consomem-se dois moles de O₂, equivalente a 64g de DQO_{degradada}.



Segundo Chernicharo (1997, p.41), nas condições normais de temperatura e pressão, cada grama de $DQO_{removida}$ gera o corresponde a 350 mililitros de metano. A composição média de metano no biogás de reatores anaeróbios é de 80%, mas pode variar entre 75 e 85%. Em geral, o volume final de metano, em função da $DQO_{degradada}$ e das condições de operação do reator anaeróbio, pode ser calculado pela equação (15) a seguir.

$$V_{CH_4} = DQO_{CH_4}/k(t) \quad (15)$$

O fator $k(t)$ é um fator de correção para a temperatura operacional do reator e é determinado pela equação (16), que se segue.

$$k(t) = (P \times K)/[R \times (273 + t)] \quad (16)$$

As variáveis desta equação são a pressão atmosférica P (1 atm), a constante dos gases R (0,08206 atm \times L/mol \times °K), a DQO correspondente a um mol de CH_4 é o K (64 gDQO/mol de CH_4). Considerando uma eficiência de recuperação de metano de 80%, obtém-se 780g DQO_{CH_4} de um kgDQO_{aplicada}. Utilizando a fórmula (15) e temperatura de 23°C obtêm-se um volume de 300 litros de metano. Considerando-se que o biogás anaeróbio contém 80% de metano, calcula-se que o volume de biogás gerado é de 375 litros.

O lodo anaeróbio já sai estabilizado. Devido a sua baixa fração de matéria orgânica, este lodo não é posteriormente diregido. Entretanto, seu volume é significativo, e deve ser transportado para ser disposto. A formação de material celular anaeróbio pode ser medida em termos de sólidos em suspensão voláteis (SSV). Para McCarty (1990, apud van Haandel & Lettinga, 1994), esta formação é da ordem de 0,02 – 0,03 gSSV/gDQO na etapa de metanogênese. A determinação da porcentagem de DQO catabolizada deve ser calculada através de um fator de correção. Com este fator pode-se determinar qual é a DQO de 1 kg de SSV de organismo. Usando-se um fator de 1,48, calcula-se que a formação de matéria celular é de $1,48 \times 0,02$ gSSV/gDQO = 0,03 gDQO_{SSV}/gDQO. Portanto, apenas 3% da DQO metabolizada na digestão anaeróbia metanogênica¹⁵ se transformam em material celular; os outros 97% se transformam em metano. Para Chernicharo (1997, p.49), a produção de células anaeróbias acidogênicas é de 0,12 a 0,15 gSSV/gDQO_{removida}, e de 0,015 a 0,050 gSSV/ gDQO_{removida} para bactérias anaeróbias metanogênicas. Logo, para cada kg de DQO metabolizada pela

¹⁵ Relação válida para efluentes já acidificados. Caso contrário, parte da DQO é utilizada para formação de lodo acidogênico

metanogênese produzem-se 30g de SSV, e outros 120g de SSV serão gerados pelo anabolismo acidogênico.

Em resumo, as diferenças entre os processos aeróbios e anaeróbios, em relação à potência requerida, produção de biogás e geração de lodo, para a estabilização de um kgDQO/d está indicada na tabela 2.21.

Tabela 2.21: Comparação entre processos aeróbios e anaeróbios ⁱ

	Processo aeróbio	Processo anaeróbio
Aeração	0,5 a 0,75kg O ₂ /dia	Não necessita
Potência	Consome 20 - 30W (p/ aeração) ⁱⁱ	Não consome (produz 30 - 35 W) ⁱⁱ
Biogás	145-216 litros/d (c/65% metano) ⁱⁱⁱ	260 - 370 litros/d (100% metano)
Lodo	315gSSV/d ^{iv}	150gSSV/d ^v

ⁱ Ambos realizando o metabolismo de 1kg DQO/dia

ⁱⁱ Segundo van Haandel & Lettinga (1994, p.31)

ⁱⁱⁱ A partir da bio-digestão de lodos do processo aeróbio

^{iv} Lodo digerido

^v (Anabolismo Acidogênico + Metanogênico)

Fonte: Elaboração própria

Observa-se na tabela 2.21 que existem diferenças significativas entre os dois processos. Os reatores aeróbios consomem uma elevada quantidade de energia. A produção de biogás no processo aeróbio é inferior ao anaeróbio. Além disto, a produção de lodo é superior. Através destas comparações conclui-se que o processo anaeróbio é energeticamente mais eficiente que o aeróbio.

6.3 - Balanço energético dos processos biológicos

Este balanço energético dos sistemas aeróbios e anaeróbios baseia-se em dados obtidos da bibliografia. Para simplificar foram considerados dados médios de poder calorífico da matéria orgânica presente nos efluentes líquidos e do biogás. Considera-se uma carga orgânica aplicada de 1kgDQO.

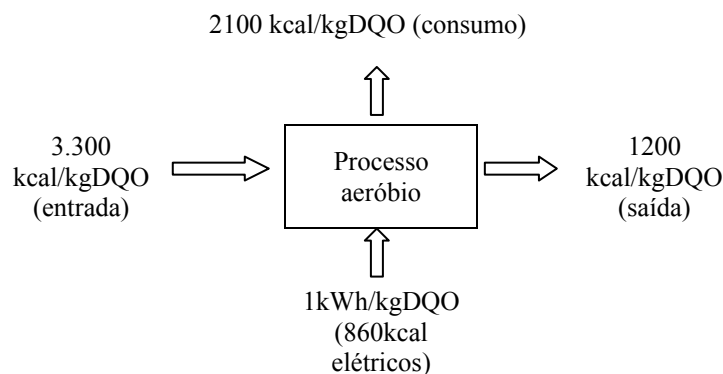
O poder calorífico médio de 1kgDQO é de 3.300kcal. Para fornecer 1 kg de O₂ para o processo aeróbio gasta-se 1kWh¹⁶, o que representa 860kcal. Neste processo, cada kgDQO produz 135gSSV que formarão entre 100 e 150 litros de biogás. Considera-se um conteúdo de 70% de metano no biogás e uma temperatura de 23 °C. A esta temperatura, a concentração de metano é de 24,3L/molCH₄. Calcula-se a energia total pela fórmula (17) e obtém-se um conteúdo energético de 550 a 800kcal.

¹⁶ Segundo PROSAB (2001), este consumo pode variar entre 0,45 e 1,67 KWh/kgO₂

$$E_p = (V_{CH_4} / 24,3 \text{ L/molCH}_4) * 191,76 \text{ kcal/molCH}_4 \quad (17)$$

Logo, o sistema recebe 3.300kcal de matéria orgânica e 860kcal de energia elétrica. São produzidos de 550 a 800kcal em metano e de 2500-2750kcal são “queimados” pelos microrganismos aeróbios. Esta “queima” ocorre nos processos de respiração e formação de material orgânico de difícil degradação anaeróbia. O resumo do balanço energético do processo aeróbio é mostrado na figura 2.6.

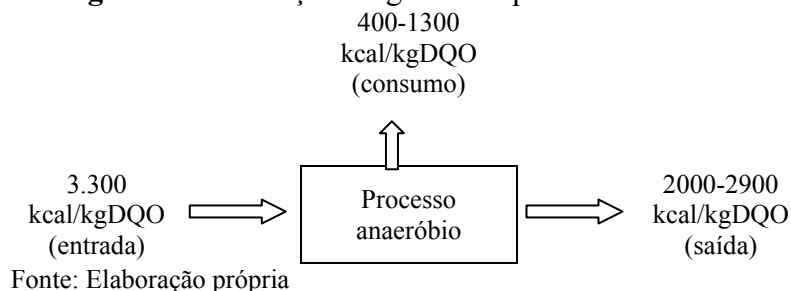
Figura 2.6: Balanço energético do processo aeróbio



Fonte: Elaboração própria

O processo anaeróbio não necessita a introdução de energia elétrica, seja para aeração ou mistura interna. O poder calorífico médio é o mesmo do sistema aeróbio, ou seja, 3.300kcal/kgDQO. O lodo produzido não é digerido posteriormente. Segundo van Haandel & Lettinga (1994), cada kgDQO removida produzirá 970gDQO_{CH₄} neste processo, equivalente a 2.900kcal. Para Chernicharo, o processo anaeróbio produzirá 350 litros de metano por kgDQO_{removida}, porém este valor varia com a temperatura do gás. Utilizando-se a fórmula (15) obtém-se aproximadamente 2700kcal para os 350 litros de metano. Considerando que a recuperação do metano, em alguns reatores de baixo TDH, pode ser de 70%, calcula-se que a energia recuperada mínima é de 2000kcal. Portanto, no primeiro caso as bactérias anaeróbias “queimaram” 400kcal e no segundo 1300kcal no processo. O resumo do balanço energético do processo anaeróbio é mostrado na figura 2.7.

Figura 2.7: Balanço energético do processo anaeróbio



Fonte: Elaboração própria

7 – Propriedades do Lodo

As características do lodo produzido em ETEs dependem do tipo de processo de tratamento, das características do efluente líquido e dos produtos químicos usados durante o processo. Os principais constituintes do lodo são a matéria orgânica, os nutrientes, os organismos patogênicos e os metais pesados. Segundo Tsutiya (2001, apud David 2002), a concentração de matéria orgânica no lodo varia de 41 a 71% em ETEs da SABESP. Para MetCalf & Eddy (1991, apud David 2002), a concentração de sólidos totais (ST) no lodo digerido está entre 6 e 12% e de sólidos voláteis (SV) entre 30 e 60% dos ST.

Segundo Tsutiya (2000, apud Comparini, 2001), está se desenvolvendo uma tecnologia para transformar lodo de processos biológicos em um óleo combustível semelhante ao diesel. Para cada tonelada de lodo, em base seca, pode-se produzir entre 200 e 300 litros de combustível. O processo é feito em ambiente anóxico a uma temperatura de até 450⁰C.

A concentração de macronutrientes no lodo é bastante significativa, porém é inferior a encontrada em fertilizantes comerciais. Pode-se encontrar nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, além de micronutrientes importantes. Para MetCalf & Eddy (1991, apud David 2002), a concentração de nitrogênio no lodo digerido encontra-se entre 1,6 e 6,0% dos ST, de fósforo entre 1,5 e 4,0% e de potássio entre 0,0 e 3,0% dos ST.

Em geral, o lodo de processos anaeróbio apresenta maior concentração de patogênicos, mas em todos os casos deve-se tomar todas as medidas de segurança para prevenir a proliferação de doenças. A presença de metais pesados no lodo está ligada a efluentes industriais misturados nos esgotos domésticos. Estes elementos podem causar inibição nos processos biológicos e dificultar o eventual uso do lodo na agricultura (David, 2002).

O uso de biossólidos na agricultura traz vários benefícios. Além dos macros e micronutrientes que podem ser utilizados pelas plantas, os biossólidos aumentam a umidade do solo, a concentração de húmus, a capacidade de armazenamento e infiltração da água no solo, melhorando as condições de desenvolvimento dos seres vivos (David, 2002).

8 - Propriedades do biogás

Em termos gerais, segundo Gotaas (1956), o biogás é composto em 2/3 de metano e 1/3 de gás carbônico. CENBIO (2004) indica concentração entre 50 e 90% de metano e de 10 a 50% de gás carbônico no biogás. Para Chernicharo et al. (1999), o biogás é composto principalmente

de metano (CH₄), gás carbônico (CO₂), gás amoníaco (NH₃), gás sulfídrico (H₂S), hidrogênio (H₂), e nitrogênio (N₂). PROSAB (2001) apresenta uma lista extensa de gases odorantes produzidos por decomposição anaeróbia.

O metano libera sua energia química durante o processo de combustão. A energia liberada por unidade de peso ou volume de combustível é denominada de poder calorífico. O poder calorífico do biogás depende da concentração de metano, de acordo com a tabela 2.22 e figura 2.8.

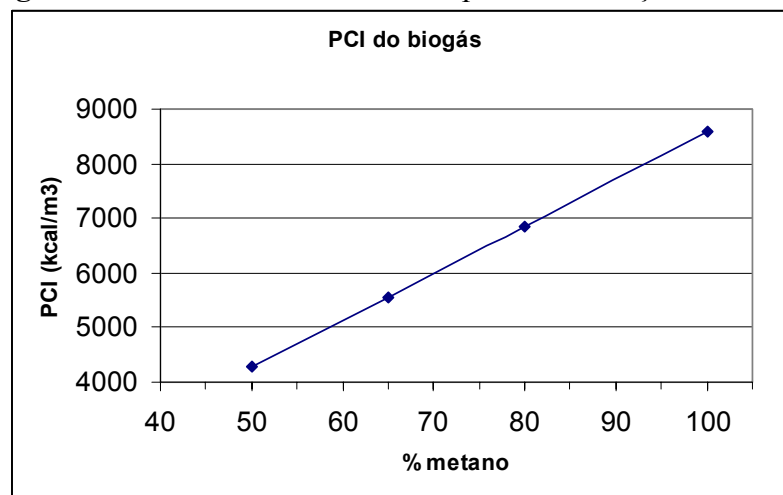
Tabela 2.22: Poder calorífico inferior por concentração de metano

% metano (por volume)	% gás carbônico	Poder Calorífico Inferior (PCI)	
		kJ/g	MJ/litro
50	50	13,4	17,9
65	35	20,3	23,3
80	20	29,9	28,7
100	0	50	35,9

Fonte: Adaptado de Pauss, A. (1987)

A recuperação do metano é feita sem dispêndio extra de energia e sem a necessidade de um processo adicional. Uma das principais características dos gases formadores do biogás é a baixa solubilidade em meio aquoso. O metano é pouco solúvel no meio líquido e escapa espontaneamente. Este é um benefício importante quando comparado com a recuperação do etanol, que necessita de equipamentos especiais e energia. A solubilidade do metano a 35°C é indicada pela constante de Henry em $1,005 \times 10^{-3}$ mol/(l.atm). Desta forma, segundo Pauss, A.(1987), sob pressão de 100kPa (1 bar) e com 60% de metano no biogás, sua solubilidade é perto de 10 mg/l (ou 0,6mM).

Figura 2.8: Poder calorífico inferior por concentração de metano



Fonte: Adaptado de Pauss, A. (1987)

Normalmente, a perda de metano que sai dissolvido no efluente final é muito baixa se comparada ao total recuperado, pois a produção por volume de reator é elevada. Entretanto, se a concentração de matéria orgânica é baixa, como nos esgotos domésticos, a perda de metano poderá ser significativa, especialmente se a digestão for realizada em temperatura ambiente. A tabela 2.23 indica valores de solubilidade de diversos gases formadores do biogás.

Tabela 2.23: Solubilidade de alguns componentes do biogás

Componentes	Solubilidade em água g/l
Metano	0,025/0,064
Gás carbônico	520
Gás amoníaco	4,19
Gás sulfídrico	1,69
Mercaptanas	<50

Fonte: Adaptado PROSAB (1999)

A densidade de energia armazenada do biogás é baixa, o ponto crítico do metano é $-82,1^{\circ}\text{C}$, e não pode ser liquefeito em temperaturas acima deste valor. Esta característica dificulta o seu uso nos meios de transporte. Segund Pauss, A. (1987), em condições padrão de temperatura e pressão, o poder calorífico do metano é 1/1000 comparado com o mesmo volume de petróleo. Entretanto, pressurizado a 20 MPa (200bar), um litro de metano equivale a 1/5 de litro de petróleo.

Pauss, A. (1987) considera dois fatores determinantes da concentração de metano no biogás: o estado de oxidação do substrato e o equilíbrio físico-químico dos vários tipos de carbono inorgânico. O primeiro é o estado médio de oxidação do substrato. Este não varia com o tempo, pois nenhum oxigênio ou qualquer outro agente oxidante é introduzido na mistura, apenas o que for proveniente do substrato. A metanogênese de um mol de glicose produz três moles de metano e três moles de gás carbônico. Entretanto, o gás carbônico poderá ser dissolvido e hidrolisado na fase líquida ou convertida em mais metano pelas bactérias. O gás carbônico passa da fase sólida para a fase líquida transformando-se em ácido carbônico. Pauss, A. (1987) considera que uma mistura em equilíbrio de gás carbônico e ácido carbônico, para uma temperatura de 35°C , tem constante de Henry de $2,34 \times 10^{-2} \text{ mol}/(\text{l.atm})$. Ele demonstra que nestas condições, e com pressão de um bar, um biogás com volume de 40% de CO_2 tem a concentração de saturação de CO_2 equilibrada em 9,8mM. Esta concentração é 16 vezes maior que a do metano. Isso significa 433 mg/l, ou 43 vezes mais solubilizado que o metano por peso.

O segundo fator é o equilíbrio físico-químico dos vários tipos de carbono inorgânico no meio líquido em fermentação. O gás carbônico dissolvido se transforma em ácido carbônico. Esse se dissocia em bicarbonato (HCO_3^-) e depois em carbonato (CO_3^{2-}), que ficará em equilíbrio. O ponto de equilíbrio depende: do pH do meio, da capacidade de tamponamento e da alcalinidade. Quanto maior o pH mais carbonato será formado. Uma grande concentração destes dois ânions requer uma quantidade equivalente de cátions para equilibrar. Estes cátions são gerados a partir da biodegradação do nitrogênio orgânico, que forma amônio (NH_4^+). O amônio liga com bicarbonato e ajuda na sua solubilização. Conseqüentemente, mais CO_2 se solubiliza.

A pressão do biodigestor pode ser ajustada para aumentar a concentração de metano no biogás. De acordo com a lei de Boyle-Mariotte, aumentamos a pressão parcial do CO_2 quando aumentamos a pressão na fase gasosa. Entretanto, a solubilidade de CO_2 e H_2CO_3 dependem da lei de Henry. O mesmo ocorre para o CH_4 , mas, por causa da sua baixa solubilidade, um aumento da pressão de 100 para 200kPa resultaria numa perda adicional de metano no líquido muito inferior a de CO_2 .

Ao queimar o biogás em motores, fornos ou fogareiros, a porcentagem de CO_2 não é fator crítico. Entretanto, a eficiência destes equipamentos varia com a composição relativa dos gases no biogás. Desta forma, seria importante manter a concentração relativa de CO_2 constante.

Para a remoção de vapor d'água são usados alguns processos como a condensação após compressão e ou resfriamento, absorção física em solução e absorção física em sólidos. Sulfeto (H_2S) pode ser removido através da oxidação em um filtro de óxido de ferro.

O biogás contém gases causadores do efeito estufa. Efeito estufa é um fenômeno que provoca a mudança do balanço energético do planeta. Segundo dados levantados pelo inventário brasileiro de emissões de metano, feita por Alves & Vieira (1998), os efluentes líquidos industriais e os esgotos emitiram aproximadamente 82,75 e 39,34 Gg CH_4 em 1990. Este valor aumentou para 86,27 e 43,09 Gg CH_4 em 1994, respectivamente. Estes valores representam aproximadamente 16,50% e 16,04% das emissões totais de metano no país, em 1990 e 1994, respectivamente. O metano tem um efeito de aquecimento da atmosfera 21 vezes maior que o CO_2 , portanto deve-se evitar ao máximo a sua emissão. A queima do biogás é uma boa

solução para este problema, e também pode contribuir para melhorar a oferta de energia em alguns locais.

9 – Usos para o biogás

Com poder calorífico inferior (PCI) entre 4.300 e 6.850 kcal por metro cúbico, o biogás é uma fonte primária de energia. Pode ser transportado e armazenado. O armazenamento do biogás é necessário na maioria das vezes. Entretanto, deve-se ter uma precaução; pois, segundo Gotaas (1956), a mistura de 5%-14% de metano e ar pode explodir com a ignição, se o volume total for grande. Portanto, este armazenamento deve ser feito em um reservatório adequado.

De acordo com a portaria nº32, de 6 de março de 2001, da Agência Nacional do Petróleo, que regulamenta a venda de gás natural e biogás como combustível veicular, seu transporte e armazenamento devem seguir a norma ABNT/NBR 13.973 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Para armazenamento de gás em baixa pressão foram encontrados exemplos utilizando-se reservatórios impermeáveis de material plástico, fibroso ou metálico. Nos casos pesquisados, não se indicou normas técnicas para sua execução.

O biogás pode substituir outros combustíveis usados na indústria. Comparando-se o metro cúbico de biogás contendo 5.500 kcal (PCI) com outros combustíveis, obtêm-se o corresponde a: 1,1 litro de álcool anidro; 1,14 litro de álcool hidratado; 3,0 kg de bagaço de cana; 2,17 kg de lenha; 0,9kg de carvão vegetal; 1,4 kg de carvão mineral; 0,7 litro de gasolina; 0,6 litro de óleo diesel; 0,2 m³ de GLP; e 0,64 kg de gás natural¹⁷.

O biogás pode ser usado em diversos fins, tanto nas residências, indústrias como em estações de tratamento de esgotos. Nas residências pode-se usar o biogás para: cocção de alimentos, aquecimento de água, refrigeração de alimentos e iluminação. Para Gotaas (1956), são necessários 2,0 m³ de biogás por dia para cocção de uma família de cinco a seis pessoas. O autor calcula 3,0 m³ para aquecer 100 litros de água, 0,6 m³ para um banho de banheira ou 0,35 m³ para um banho de chuveiro. Para iluminação ele considera que entre 0,10 e 0,15 m³ por hora por ponto de luz é suficiente. Para Oliveira (1979), um lampião consome 0,28 m³/hora de biogás. Observa-se que o consumo de biogás para iluminação pode variar até três vezes comparando-se os resultados dos dois últimos autores.

¹⁷ Esta massa, submetida à temperatura de 20°C e 1atm, equivale a 0,64m³ de gás natural.

Entre os usos industriais destaca-se a combustão para a geração de energia mecânica, fornecimento de vapor de processo ou aquecimento de caldeiras e fornos. Além destes, também tem utilidade em processos térmicos para secagem e higienização de insumos. Neste último caso, o biogás de ETEs pode ser usado na higienização do lodo da própria estação. Em qualquer um dos casos, o biogás pode servir como combustível para motores adaptados à geração de eletricidade.

9.1 – Uso do biogás para gerar eletricidade

O biogás pode ser utilizado para gerar energia elétrica. Segundo o CENBIO (2004), a geração de eletricidade a partir dele pode ser feita por duas tecnologias diferentes: as turbinas e os motores de combustão interna (ciclo-Otto) com geradores.

As turbinas a gás foram desenvolvidas a partir da tecnologia utilizada na aviação. A adaptação para melhorar a geração de eletricidade diminui a velocidade de saída dos gases da tecnologia original. O gás é comprimido e segue para a câmara de combustão. Na combustão, o gás quente e pressurizado atravessa ao longo da turbina movendo suas pás. A movimentação das pás aciona o gerador, produzindo uma tensão. Ao longo da turbina, a pressão e a temperatura do gás diminuem. Segundo Ieno (1993, apud Romero, 2004), o rendimento das turbinas a gás é maior quanto mais alta for a temperatura de entrada, e quanto menor for a pressão de saída. Este princípio de eficiência segue a segunda lei da termodinâmica.

Outra tecnologia para gerar eletricidade é a turbina de ciclo Brayton. Nesta tecnologia, diferente da anterior, o ar é comprimido na entrada e segue para a câmara de combustão. Nesta câmara ocorre a mistura com o combustível e a queima. A mistura em alta temperatura e pressão atravessa a turbina movimentando as pás. A turbina move o gerador de corrente elétrica e o compressor de entrada. O gás sai com temperatura e pressão reduzidas.

Os motores ciclo-Otto foram desenvolvidos a partir de 1867. Neles, a combustão ocorre numa câmara. O combustível e o ar são submetidos à pressão alta pelo pistão. Neste ponto ocorre o centelhamento de uma faísca, que causa a ignição da mistura. A explosão empurra o pistão, gerando movimento. Mais combustível entra na câmara e o processo se reinicia. Parte da energia do combustível se transforma em energia térmica, saindo junto com o gás de exaustão.

O biogás pode ser utilizado como combustível neste tipo de motor. Conectando-se um motor ciclo-Otto a um alternador, pode-se gerar eletricidade. A combustão do biogás no interior do motor produz energia mecânica. Essa energia é transmitida ao gerador que, girando um alternador, produz tensão. Segundo o CENBIO (2004), o consumo de biogás para geração de eletricidade em motores ciclo-Otto e em microturbinas está indicado na tabela 2.24.

Tabela 2.24: Consumo de biogás para geração de energia elétrica

Equipamento	Potência	Rendimento	Consumo de biogás (m³/h)	Consumo de biogás (m³/kWh)
Motor a Gás ciclo-Otto (Pequeno Porte)	30 kW	35%	14,74*	0,49*
Microturbinas (Pequeno Porte)	30 kW	27%	19,11*	0,64*

Fonte: Adaptado de CENBIO, 2004.

* O estudo considera um Poder Calorífico Inferior (PCI) do Biogás de 5.000 kcal/Nm³

A eficiência de geração de eletricidade nos motores pode chegar a 40% e nas turbinas em 30%. De acordo com a tabela 2.24 acima, o consumo de biogás para gerar 1kWh, utilizando-se motores ciclo-Otto, é de 0,49 m³/kWh e com as microturbinas de 30 kW, 0,64 m³/kWh. Outra diferença apresentada pelo estudo do CENBIO (2004) é na produção de óxidos de nitrogênio (NO_x). Nos motores a concentração destes gases no gás de exaustão fica entre 250 ppm e 3.000 ppm, muito superior às turbinas a gás, que apresentam entre 35 ppm e 50 ppm.

Parte do calor dos gases de exaustão do processo de combustão pode ser recuperado. A recuperação desta energia térmica pode ser feita utilizando-se trocadores de calor. Esta energia pode produzir vapor, eletricidade, força motriz e frio. A produção simultânea de energia térmica e energia elétrica a partir do uso de um combustível convencional é conhecida como processo de cogeração. De acordo com a Petrobrás Distribuidora (2005), com o processo de cogeração pode-se aproveitar até 80% da energia do combustível. Este processo é aplicado em diversos segmentos industriais, comerciais e de serviço. Entre os benefícios da cogeração estão: a auto-suficiência energética, a qualidade da energia elétrica, a melhoria da eficiência energética do processo e a redução dos impactos ambientais.

Em relação ao estudo do CENBIO (2004), os custos de instalação e os custo de geração de eletricidade em cada uma das tecnologias são bastante diferentes. Segundo este estudo, o

custo do kW instalado utilizando motores ciclo-Otto é de 430,43 US\$/kW. No caso da microturbina, este custo é de 3.377,36 US\$/kW.

Algumas observações sobre o estudo do CENBIO (2004) são importantes. Apesar de ambos os equipamentos terem potência de 30 kW, nenhum dos dois atingiu este valor na prática. Devido à diferença de pressão e temperatura ideais para o seu funcionamento (1atm e 15⁰C), a potência média atingida pela microturbina foi de 25 kW. Além disto, cerca de 5,5 kW foram consumidos pelos equipamentos, compressor e dois secadores, necessários ao funcionamento da microturbina. Ou seja, a energia elétrica líquida entregue pela microturbina é de 19,5 kW. O motor ciclo-Otto tem sua potência máxima reduzida para 25-28 kW, devido às perdas de eficiência deste gerador, relativas à variação de temperatura e pressão.

De acordo com CENBIO (2004), o custo da energia elétrica produzida pelo motor ciclo-Otto é de 280,8 R\$/MWh, e a energia elétrica gerada pela microturbina alcança 469,0 R\$/MWh. Este estudo considerou o custo total de implantação (sem IPI) do motor ciclo-Otto em R\$ 21.000, com vida útil de 5.000 horas, e da microturbina em US\$ 66.000, com vida útil de 40.000 horas. Entretanto, o estudo afirma que o motor ciclo-Otto deve ser recondicionado sete vezes para atingir uma vida útil igual à da microturbina e que cada recondicionamento tem custo de R\$8.226,67. Portanto, o custo do recondicionamento do motor equivale a 70% do custo total de implantação é o principal determinante do custo da energia elétrica gerada por ele.

Segundo CENBIO (2004), o custo de operação e manutenção do motor ciclo-Otto é de R\$3.400 para cada período de 5.000 horas. A microturbina tem custo de R\$141.585,48 para um período de 40.000 horas. O estudo considera o custo com mão-de-obra igual para os dois processos. Entretanto, este custo não é contabilizado na geração. A mão-de-obra para manutenção dos equipamentos é considerada como parte dos custos da ETE. No estudo do CENBIO (2004), o custo do combustível foi considerado nulo, pois o estudo supõe que o combustível é um subproduto do tratamento anaeróbio, portanto, sem valor. Entretanto, se o biogás for considerado como produto sub-utilizado do processo, pode ser aproveitado economicamente para ajudar na redução do custo total do esgoto tratado.

Os custos totais da análise do CENBIO (2004) não consideram os custos de automação e monitoramento deste sistema. Entretanto, não citou se estes são iguais para os dois sistemas. Os valores dos equipamentos, materiais e acessórios importados foram dados considerando o dólar americano a R\$2,29 e não incluem o Imposto de Produção Industrial (IPI). Entretanto,

não se pode identificar quais componentes foram importados em cada um dos sistemas, no caso de se fazer uma posterior adaptação dos custos totais às flutuações do câmbio.

9.2 – Uso do biogás nas ETEs

O biogás gerado em ETEs pode ser destinado à desinfecção do lodo produzido na própria estação. Segundo Borges et al. (2004), o biogás produzido numa ETEs anaeróbia tipo UASB é mais que suficiente para higienizar todo o lodo produzido pela mesma ETE. Neste trabalho, usou-se, como indicadores microbiológicos, ovos de *Ascaris lumbricoides*. Estes organismos patogênicos são comumente encontrados em esgotos do país e são bastante resistentes aos processos de tratamento aeróbio e anaeróbio. A eliminação e a inativação dos ovos viáveis de helmintos é resultado do aquecimento térmico do lodo pela queima do biogás. Foram realizados dois tipos de ensaios de aquecimento. No primeiro, o lodo foi aquecido a 70⁰C e mantido nesta temperatura. Porém, logo na primeira amostra já se indicava a eliminação dos ovos viáveis. Foi usado todo o biogás produzido durante um dia para aquecer todo o lodo gerado no mesmo período. No segundo, o lodo foi aquecido a temperaturas que variavam entre 23 e 54⁰C. Neste caso, a higienização completa ocorreu em duas horas de aquecimento. O sistema se mostrou auto-sustentável, pois a energia calórica fornecida pelo biogás gerado é mais que suficiente para aquecer o lodo gerado no processo até a temperatura de higienização. Segundo Borges (2004), o aquecimento térmico do lodo, utilizando-se no caso o biogás como combustível, aumenta sua biodegradabilidade. O retorno deste lodo processado termicamente ao reator UASB, segundo o autor, resulta numa maior taxa de produção de biogás. Logo, a eficiência global de remoção de matéria orgânica no sistema aumenta e a produção de biogás também.

Capítulo III – Estudos de Caso

A análise de casos tem o objetivo de comparar e avaliar a operação de sistemas de tratamento de esgoto com os valores teóricos. Na prática, a operação de sistemas de tratamento de esgoto tem sua eficiência influenciada por diversos fatores. A produção de biogás, lodo e o consumo de energia elétrica variam caso a caso. O levantamento e análise de dados destes sistemas poderão indicar ações de melhoria, assim como contribuir para aperfeiçoar projetos de novas estações. Medidas que visam aumentar a eficiência energética destas estações também serão enfocadas.

Segundo Pauss (1987), o PCI do biogás varia de 4.300 a 6.850kcal/Nm³, com concentração de metano variando entre 50 e 80%, respectivamente. Este valor¹⁸ pode variar de ETE para ETE. Em geral, o conteúdo energético do biogás gerado em reatores anaeróbios tipo UASB é maior, pois a concentração de metano neste é próxima de 80%, enquanto na digestão anaeróbia de lodos de processos aeróbios esta é de 66% em média. Em alguns casos foram feitos os cálculos teóricos da produção de biogás, lodo e o consumo de energia elétrica. Nos sistemas com reatores UASB, o volume teórico de biogás recuperado foi considerado em 80% do biogás produzido, ou seja, 300 litros por kgDQO removida.

Os parâmetros dos principais sistemas de tratamento de efluentes líquidos estão resumidos no ANEXO I e foram apresentados por von Sperling (2001). São apresentados dados de eficiência na remoção de DQO, concentração de DQO no efluente final, produção de lodo, consumo de eletricidade e custos de implantação e operação. A partir destes dados calculou-se a eficiência energética máxima e mínima dos sistemas que consomem eletricidade na aeração. Os valores de eficiência energética dos sistemas de tratamento então indicadas no ANEXO II.

As ETEs analisadas foram separadas em dois grupos. O primeiro apresenta dados de operação, o segundo apresenta apenas dados de projeto. As estações em operação estudadas são: ETE Barueri, ETE Arrudas, ETE Varginha e ETE Ipatinga. Por seu turno, a ETE Piçarrão foi concluída, mas ainda não opera, enquanto que a ETE Onça se encontra atualmente em construção. Porém, a qualidade e a confiabilidade dos dados obtidos não estão comprovadas.

¹⁸ Para simplicidade de cálculo considera-se que o PCI de todo biogás gerado em ETEs está em 5.000kcal/Nm³. Este valor foi utilizado no estudo de geração elétrica a partir do biogás pelo CONBIO (2004). Além disto, foi considerando o PCI do biogás, e não do metano, para possibilitar o cálculo da energia elétrica produzida em motores ciclo-Otto e microturbinas à biogás, segundo o CENBIO (2004); pois, as tecnologias de geração de eletricidade, a partir do biogás, relacionam o volume de biogás queimado com a energia produzida.

1 – ETEs em operação

1.1 - ETE Barueri (Barueri/RMSP)

A caracterização da estação de tratamento de esgoto (ETE) de Barueri foi feita através de dados fornecidos, bibliografia e visita a campo. Esta ETE é a maior, entre cinco existentes na região metropolitana de São Paulo, conforme indicado na tabela 3.1. Todas possuem sistema de tratamento por lodos ativados.

Tabela 3.1: ETEs na região metropolitana de São Paulo.

Estação Tratamento Esgoto	Vazão (m ³ /s)	Consumo (kWh/mês)	kWh / kg de DQO _{remov}
ETE ABC	1,4	2.014.628	2,54
ETE BARUERI *	6,15	6.012.646	1,05
ETE PARQUE NOVO MUNDO	1,2	1.848.795	1,48
ETE SÃO MIGUEL	0,5	896.761	0,91
ETE SUZANO	0,7	693.648	0,66

*dados SABESP (2002), inclui consumo elétrico na elevatória de chegada.

Fonte: SABESP (1997)¹⁹

Em Barueri, são tratados cerca de 6,15m³/s de esgoto, de uma população de 3,0 milhões de habitantes, ocupando uma área de 863 mil m². Seu consumo mensal de eletricidade gira entorno de 6,0 GWh e seu custo mensal está na faixa de R\$ 2,0 milhões (SABESP, 2002). A energia elétrica representa aproximadamente 26% do custo de operação da ETE Barueri (SABESP, 2002). O consumo total equivale a uma potência média de 8,3 MW.

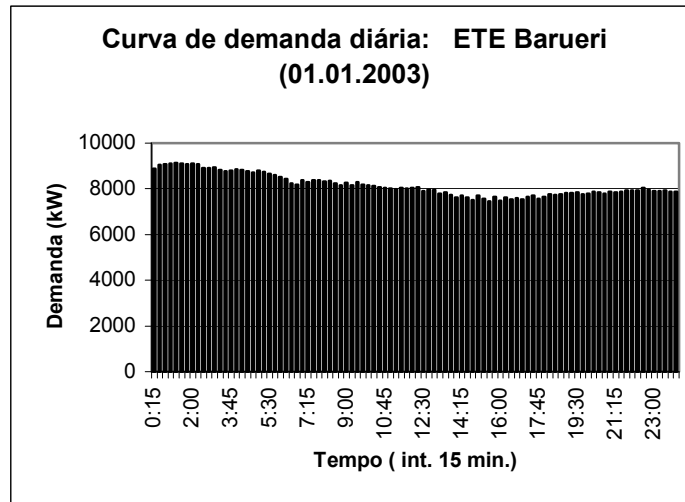
O interceptor Tietê Oeste Margem Sul (ITI-6) chega a ETE Barueri instalado a cerca de 30 metros de profundidade. O fluxo é encaminhado ao poço distribuidor e é recalcado por bombeamento até as grades mecanizadas. O poço é equipado com pórtilho para remover sólidos e com insuflamento de ar para eliminar os gases liberados pelo esgoto.

Quatro conjuntos elevatórios, que operam com motores de 3100 HP, recalcam o esgoto em 30 metros. Estes motores operam com velocidade variável e fixa. De acordo com a SABESP, deve-se instalar um sistema de instrumentação para controlar automaticamente a velocidade de rotação das bombas, e desta forma, manter o nível desejado no poço distribuidor. O consumo de energia elétrica da elevatória de chegada equivale a 30% do total utilizado na ETE.

¹⁹ Dados fornecidos pela Eng.^a Andréa Matos (SABESP)

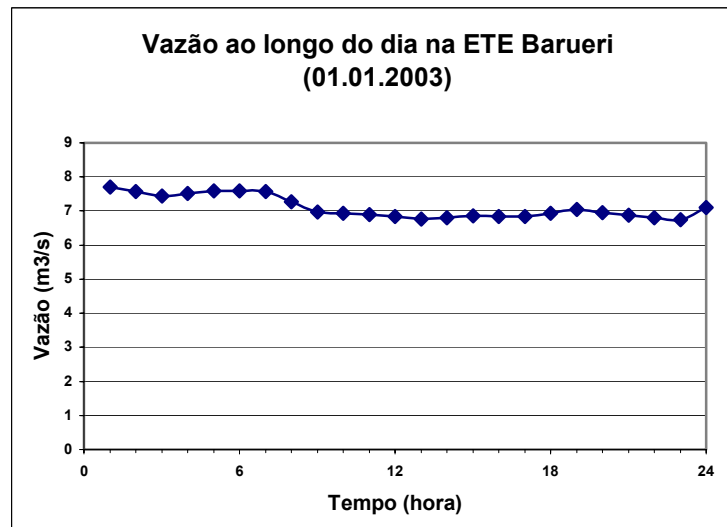
Observando as figuras 3.1 e 3.2 nota-se que a demanda de carga depende da vazão de esgoto que chega na estação. As duas curvas foram traçadas com os dados relativos ao dia 1º de janeiro de 2003.

Figura 3.1: Demanda de carga na ETE Barueri*



* Dados do dia 01.01.2003
Fonte: Cetesb (2003)

Figura 3.2: Vazão de esgoto na ETE Barueri*



*Dados do dia 01.01.2003
Fonte: Cetesb (2003)

A ETE Barueri tem demanda contratada de 10500 kVA fora da ponta e 9400 kVA na ponta. Duas linhas de distribuição alimentam a ETE Barueri. A subestação principal tem capacidade máxima de 33 MVA e opera inicialmente em 88 kV, mas, de acordo com a SABESP, será de 138 kV com potência de 55 MVA. A tensão é abaixada para 13,8 kV e distribuída nas unidades de processo. Os processos unitários da ETE Barueri são mostrados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Processos unitários da ETE Barueri.

Unidades da Fase Líquida	Unidades da Fase Sólida	Sistemas de Apoio
Poço Distribuidor e Elevatória Final	Adensadores por Gravidade	Edifício dos Compressores
Grades Médias Mecanizadas	Adensadores por Flotação	Gasômetro/ Queimadores
Caixas de Areia	Digestores	Edifício das Caldeiras
Decantadores Primário	Condicionamento Químico dos Lodos	Sistema de Água de Utilidades
Tanque de Aeração	Desidratação Mecânica	Sistema Elétrico
Decantadores Secundários		

Fonte: Adaptado de Sabesp, www.sabesp.com.br, em agosto de 2003.

Os tanques de aeração têm um consumo elétrico de aproximadamente 3,0 GWh por mês, equivalente a 50% do consumo elétrico total da ETE. Nestes tanques, as bactérias aeróbias realizam o consumo de matéria orgânica, produzindo CO₂ e biomassa. Alimento não é o fator limitante. Entretanto, elas consomem muito oxigênio, e por isso é necessária uma constante aeração do tanque. Para isso são usados quatro motores de 3550 cv. A potência total do sistema de aeração é de 10.444 kW. Estes movimentam quatro compressores do tipo centrífugo múltiplo de 6000 SCFM. São injetados cerca de 102.000 Nm³/h de ar nos tanques. Os oito tanques de aeração têm formato retangular com 130 m de comprimento, 25 de largura e 6 m de altura útil. Dividindo-se a potência total dos motores para aeração e o volume total dos tanques, obtém-se a densidade de potência. No caso da ETE Barueri ela é de aproximadamente 67 W/m³. A aeração é realizada por uma malha de 8.500 difusores de bolha fina que ficam no fundo do tanque. Todo efluente deste tanque segue para os decantadores secundários.

Em seguida, o tanque de flotação consome aproximadamente 3% do total de energia elétrica utilizado na ETE. O lodo proveniente do decantador secundário é adensado para cerca de 4%. O processo de flotação é baseado na injeção de água pressurizada com ar saturado. Quando a pressão cai formam-se micro-bolhas, que ao subirem, arrastam os sólidos que se grudam nelas. Os sólidos são removidos na superfície por raspadores e enviados para o tanque de lodos, onde se juntam com o lodo do decantador primário. Todo o lodo primário e secundário é então bombeado para os biodigestores para ser estabilizado. Outros gastos com energia elétrica na ETE estão nos filtros-prensa e bombas de recirculação de lodos e efluentes.

Depois de serem digeridos e passarem pelo condicionamento químico, o lodo vai para o processo de desidratação mecânica. Esta etapa ocorre nos filtros-prensa. O lodo condicionado é injetado entre placas de 4m² cada e se transforma em uma “torta de lodo”. Com isto, o lodo atinge um teor de 40% de sólidos. Este sistema possui bombas de alta pressão, dois conjuntos filtro-prensa com 151 placas cada um e duas correias transportadoras para a torta de lodo. A

produção de lodo na ETE Barueri é de aproximadamente 230 toneladas por dia, que é levada para aterros sanitários. Os gastos com transporte eram de aproximadamente R\$ 50 mil em 1997, e já chegaram a mais de R\$ 200 mil em 2002, SABESP (1997 e 2002). Algumas características químicas do lodo da ETE Barueri são apresentadas pela SABESP (2001 apud David, 2002) e estão resumidas na tabela 3.3 a seguir.

Tabela 3.3: Concentração de Metais Pesados no Lodo da ETE Barueri

Metal	Cádmio	Chumbo	Cobre	Níquel	Zinco	Cromo
Concentração*	11	181	654	345	2287	557

*Concentração em mg/kg de lodo em base seca

Fonte: Adaptado de David (2002)

Existe uma grande produção de biogás nesta ETE. Cerca de 26.000 m³/dia são gerados nos digestores anaeróbios (biodigestores). A tabela 3.4 e a figura 3.3 indicam um resumo da composição do biogás desta ETE, apresentado em CENBIO (2004).

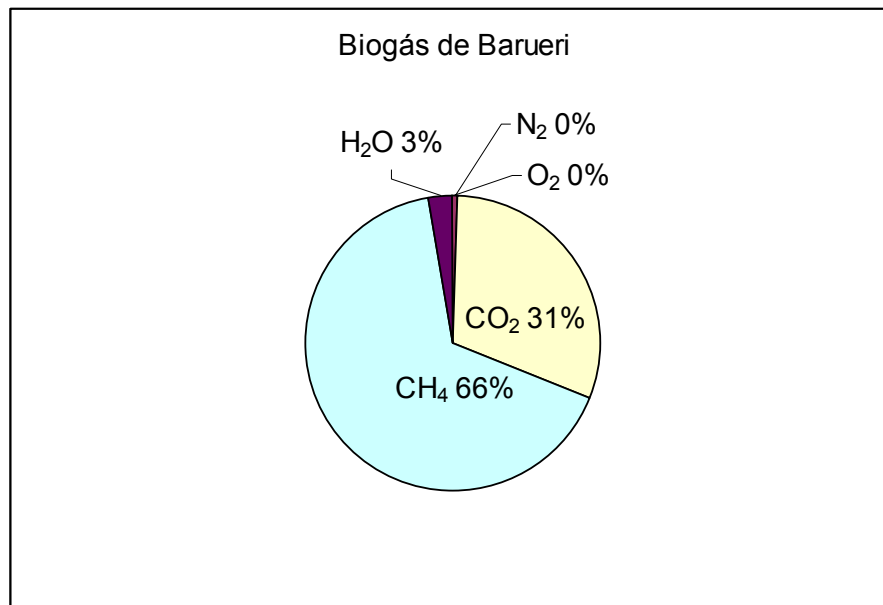
Tabela 3.4: Características do biogás da ETE Barueri

Componentes	Unidade	Mínimo	Máximo	Médio
O ₂	% vol.	0,05	0,40	0,07
N ₂	% vol.	0,10	2,40	0,46
CO ₂	% vol.	28,00	32,70	30,57
CH ₄	% vol.	65,00	68,00	66,53
H ₂ S	ppm em vol.	19,00	340,00	134,00
H ₂ O	% vol.	1,80	3,10	2,52
PCI*	KJ/m ³ a 25 ⁰ C	21.678,3	22.990,6	22.195,1
PCS**	KJ/m ³ a 25 ⁰ C	24.099,6	25.556,7	24.673,7
Densidade Relativa	A 15 ⁰ C e 101,325 kPa	0,8312	0,8741	0,8555
Densidade	kg/m ³	1,019	1,071	1,048

Fonte: Adaptado de CENBIO (2004)

* Poder Calorífico Inferior (PCI)

** Poder Calorífico Superior (PCS)

Figura 3.3: Características do biogás da ETE Barueri

Fonte: Adaptado de CENBIO (2004)

Segundo estudo do CENBIO (2004), a geração de energia elétrica a partir do biogás da ETE Barueri poderá evitar a emissão de 8.322 tCO₂ equivalente por ano. Esta emissão evitada pode ser comercializada no mercado internacional de créditos de carbono. Considerando um valor pago por tonelada equivalente de CO₂ de US\$ 5,0, o estudo do CENBIO (2004) calcula uma receita de US\$ 41.620 por ano em créditos de carbono para a ETE Barueri.

Segundo David (2002), o biogás tem um poder calorífico entre 21.000-25.000 kJ/m³ (5.000-6.000 kcal/m³). Se este gás fosse usado para gerar eletricidade, com rendimento de 35%, poderia produzir quase 1,6 GWh/mês, equivalente a 30,7% do consumo da ETE Barueri. A potência elétrica seria de 2,2 MW, utilizando-se motores ciclo-Otto.

A remoção de matéria orgânica na ETE é de 201.000 kgDQO/dia. Considerando este valor e o consumo elétrico total da ETE, 6,0 GWh/mês, calcula-se sua eficiência final em 1,0 kWh/kgDQO. Entretanto, 30% do consumo total se localiza na estação elevatória. Logo, excluindo a elevatória, sua eficiência é de 0,70 kWh/kgDQO removida.

Considerando que o consumo elétrico no tanque de aeração equivale a 50% do total, a eficiência na aeração é de 0,5 kWh/kgDQO. De acordo com o ANEXO II, a eficiência prevista para a aeração em sistemas de lodos ativados está entre 0,49 e 1,03 kWh/kgDQO removida. Logo, a ETE Barueri está de acordo com os valores teóricos.

1.2 - ETE Arrudas (Belo Horizonte/MG)

A caracterização da estação de tratamento de esgoto Arrudas foi feita através de dados fornecidos, bibliografia e visita a campo²⁰. Esta ETE é a maior existente na região metropolitana de Belo Horizonte. Seu processo de tratamento foi concebido de acordo com sistema aeróbio por lodos ativados. A ETE Arrudas trata cerca de 1,3 m³/s de esgoto, para uma população de projeto de 1,0 milhão de habitantes. Entretanto, a carga orgânica recebida pela estação equivale a uma população inferior a 500 mil habitantes. De acordo com o projeto, a vazão atual da ETE deveria ser de 2,2 m³/s, mas uma grande parte do esgoto previsto não chega na ETE. Este problema não terá solução rápida, pois as ligações clandestinas de esgoto na rede pluvial da cidade são difíceis de localizar. O custo elétrico mensal da ETE é de aproximadamente R\$ 160 mil, ou 70% dos custos totais. Considerando uma tarifa de R\$200/MWh, calcula-se seu consumo elétrico mensal em 800 MWh/mês. É importante ressaltar que esta ETE não possui elevatória, pois todo esgoto chega por gravidade. Isso representa uma significativa economia de energia, pois as bombas elevatórias requerem uma potência elevada.

A ETE Arrudas possui dois tanques de aeração com volume individual de 17.250 m³/unidade. A potência de projeto²¹ do conjunto de sopradores na ETE é de 6.200cv, ou 4.650 kW. E segundo os cálculos de projeto, a densidade de potência dos tanques de aeração na ETE Arrudas é de 84 W/m³.

De acordo com dados fornecidos pela COPASA, relativos aos anos 2003 e 2004, podemos calcular o volume de biogás produzido na ETE. No ano de 2003, foram removidos cerca de 15,5 milhões de kgDQO, produzindo entre 2,2 e 3,3 milhões de m³ de biogás. Este valor representa cerca de 6 a 10 mil m³ de biogás por dia. Considerando a semelhança com o processo da ETE Barueri, a composição média do biogás tem 66% de metano. Utilizando-se este biogás para gerar eletricidade, através de motores ciclo-Otto, pode-se obter uma potência de 510 a 870 kW, produzindo entre 380 e 570 MWh/mês. No ano de 2004, até Outubro, foram removidos cerca de 14,4 milhões de kgDQO, produzindo entre 2,0 e 3,1 milhões de m³ de biogás. Utilizando-se da mesma metodologia do exemplo anterior, pode-se gerar uma potência de 580 a 870 kW, produzindo entre 425 e 630 MWh/mês. Entretanto, todo o biogás produzido na ETE Arrudas é queimado em *flare*.

²⁰ Dados fornecidos pela Bioquímica Maria Leticia de Castro (COPASA), no dia 12 de novembro de 2004.

²¹ Apesar de solicitada, a COPASA não confirmou o valor real da potência instalada na ETE Arrudas até a data de conclusão desta Dissertação.

Considerando o consumo elétrico total de 800 MWh/mês²² e a remoção de 15,5 milhões de kgDQO/ano, calcula-se a eficiência de ETE em 0,62 kWh/kgDQO removida. Segundo von Sperling (1991), este valor se encontra dentro dos limites previsto para aeração em sistemas de lodos ativados, entre 0,49 e 1,03 kWh/kgDQO removida.

A produção de lodo desidratado na ETE foi de 7,9 mil toneladas no ano de 2003, equivale a 660 toneladas por mês. Além deste, existe uma produção mensal de sólidos grosseiros de 78 toneladas nas grades grossa e fina, na grade do adensador e no desarenador. Em 2004 foram produzidos, até outubro, 5,1 mil toneladas. O lodo desidratado é transportado até o aterro sanitário da cidade.

1.3 - ETE Santana (Varginha/MG)

Os dados da ETE Santana²³, no município de Varginha – MG, foram fornecidos na visita técnica no dia 29 de Março de 2005. A estação possui sistema UASB e opera a cerca de três anos. Após o tratamento preliminar, o esgoto afluente é bombeado aproximadamente 26 metros. Um conjunto de três bombas com potência de 67,56 CV cada, ou 49,7 kW, opera alternadamente no sistema elevatório. Cada unidade de bombeamento atinge uma vazão de aproximadamente 70 l/s. A tensão recebida na ETE é rebaixada de 13.800 kV para 440 kV. Outros usos que consomem eletricidade na ETE são, além da elevatória, o consumo no tratamento preliminar, que é pequeno, e na iluminação, que é desprezível. Portanto, o consumo total é praticamente igual ao consumo na elevatória. O consumo elétrico total no mês de dezembro de 2004 foi de 43.400 kWh, e o valor pago pela energia foi de R\$ 12.212,28.

A estação recebe 70% do esgoto doméstico do município, equivalente a cerca de 80 mil habitantes. A variação mensal da vazão afluente pode chegar a mais de 30%. Picos de vazão demandam maior consumo de energia elétrica. Entretanto, não estava disponível a curva de demanda elétrica da estação e a curva de vazão diária para a análise mais detalhada.

A vazão média de esgoto afluente em dezembro de 2004 foi de 98 l/s. Os dados mostram uma variação da vazão no reator entre 60 e 190 l/s, devido ao sistema de recalque do esgoto. A DQO do afluente foi de 634,5 mg/l, e saiu da estação com 144,7 mg/l, uma eficiência média

²² Considera-se tarifa de R\$200/MWh

²³ Dados fornecidos pelo Eng.º Frederico Werner e o Técnico Jairo Silva, ambos da COPASA, no dia 29 de Março de 2005.

de 77,2%. Este valor satisfaz os critérios da legislação estadual. De acordo com os dados, foram removidos cerca de 125.252 kgDQO neste mês. Este valor equivale ao esgoto de uma população de quase 60 mil habitantes. Dividindo-se o consumo elétrico pela DQO abatida no mês de dezembro obtêm-se 0,34 kWh/kgDQO removida. Este valor refere-se apenas à eficiência da estação elevatória, pois não existe aeração no sistema. A eficiência média dos meses de novembro de 2004 a janeiro de 2005 foi calculada em 0,53 kWh/kgDQO removida. Os valores da eficiência nos três meses analisados estão indicados na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Dados de remoção de DQO e consumo elétrico na ETE Santana

ETE Santana	DQO removida	kWh/mês	kWh/DQOremov.
Novembro/2004	123.041	39.550	0,32
Dezembro/2004	125.252	43.400	0,34
Janeiro/2005	72.646	49.350	0,68

Fonte: Adaptado de COPASA (2005)

A estação é operada por apenas um funcionário em cada um dos três turnos. O único produto químico aplicado é a CAL para corrigir a acidez do esgoto que chega na ETE. Para o melhor funcionamento do reator anaeróbio, o efluente líquido tem o pH regulado entre 6,3 e 7,8. O custo do tratamento na estação, considerando o pagamento dos funcionários e o custo da energia elétrica, foi de aproximadamente R\$ 0,05/m³ de esgoto tratado.

A ETE produz aproximadamente 50 m³ de lodo por mês, que são transportados para um aterro próprio da ETE. Considerando a DQO removida, a quantidade diária de lodo seria de pelo menos 690 kg. Por enquanto não existe medição de biogás na ETE, porém, considerando que os dados indicam uma remoção de DQO diária de 4.050 kg, o volume calculado de biogás é de 1.250 m³/dia (considerando-se a recuperação de 300 litros de biogás por kgDQO removida). Deve-se notar que se esta produção de biogás for utilizada para gerar energia elétrica, queimando-se o biogás em motores ciclo-Otto, pode-se gerar uma potência de 100 kW, equivalente a 72.960 kWh/mês. Ou seja, essa energia elétrica produzida através do processo de combustão do biogás, para liberação da sua energia química, seria mais do que suficiente para suprir a demanda elétrica da estação. Entretanto, todo o gás produzido na ETE Santana é queimado em *flare*.

Medidas para melhorar a eficiência do reator e reduzir o consumo de energia elétrica estão sendo estudadas. A substituição dos motores por outros mais eficientes com controle de rotação poderá minimizar o impacto do aumento súbito de vazão toda vez que os motores são acionados. Este aumento de vazão pode provocar distúrbios na biomassa no interior do reator

e conseqüentemente piora nas características do efluente final. Além disto, o controle da rotação evita desperdício de energia elétrica no processo de bombeamento.

1.4 – ETE Ipatinga (Ipatinga/MG)

A estação de tratamento de esgotos de Ipatinga²⁴ possui sistema UASB e opera a cerca de cinco anos. A vazão média de esgoto afluente é de 161 l/s, podendo chegar a 200 l/s. A DQO do afluente é de 824,5 mg/l, e sai da estação com 137,9 mg/l, uma eficiência média de 82,3%. De acordo com os dados, são removidos cerca de 290.500 kgDQO por mês. Este valor equivale ao esgoto de uma população de quase 140 mil habitantes.

O consumo elétrico mensal médio da ETE é da ordem de 25.310,6 kWh/mês. Dividindo-se a DQO abatida em um mês pelo consumo elétrico obtemos 0,09 kWh/ kgDQO removida.

Não existe medição de biogás, porém o volume de projeto é de 2.845 m³/dia. Com este volume seria possível gerar 240 kW, utilizando oito motores ciclo-Otto de 30kW cada um. A energia elétrica produzida seria de 175.104 kWh/mês, ou quase sete vezes o consumo da ETE. A estação produz 54,4 toneladas de lodo por mês.

2 – ETEs em implantação

2.1 - ETE Piçarrão (Campinas/SP)

A estação de tratamento de esgotos Piçarrão²⁵ se localiza na cidade de Campinas – SP. Esta ETE já está construída e foi inaugurada recentemente. Encontra-se em fase de pré-operação, e tem previsão de iniciar a operação até o fim de Novembro de 2004. A empresa de saneamento responsável pela ETE é a SANASA. Esta ETE poderá tratar uma vazão média de 556 l/s, e máxima de 934 l/s, prevista para o ano de 2020.

A carga orgânica do efluente é de aproximadamente 450 mgDQO/L, e a carga diária removida será de pouco mais de 25 mil kg DBO/dia no ano de 2020. Para o ano de 2020, espera-se uma produção de biogás da ordem de 4.800 m³/dia, com concentração de 65% de metano. Além disso, está prevista a produção de 10 toneladas de lodo por dia naquele ano.

²⁴ Os dados da ETE Ipatinga foram fornecidos pelo técnico químico Adelino Martins Júnior (COPASA), no dia 20 de Janeiro de 2005.

²⁵ Dados de projeto, fornecidos pelo Eng.º Wildson Carlos (SANASA), em 17 de novembro de 2004.

Segundo dados do Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES) da Agência Nacional de Águas (ANA), a ETE Piçarrão está sendo concebida para atender uma população de 249.093 habitantes, o que equivale a uma vazão de aproximadamente 556 l/s. A carga orgânica abatida chegará a 12.106 kgDBO/dia. A ANA, através do PRODES, investirá²⁶ na ETE Piçarrão R\$ 9.340.987,50 em 3 anos. Estes custos referem-se à construção dos reatores anaeróbios do tipo USAB e do pós-tratamento por lodos ativado.

2.2 - ETE Onça (Belo Horizonte/MG)

A ETE Onça se localiza na região metropolitana de Belo Horizonte. De acordo com dados de projeto²⁷, esta ETE será concebida com tratamento anaeróbio utilizando reatores UASB e pós-tratamento. Estima-se que a população atendida por esta estação será de 910 mil habitantes em 2007 e 1,6 milhões em 2017. A carga orgânica anual relativa à população de projeto será de 33,2 milhões de kgDQO em 2007 e 58,4 milhões de kgDQO em 2017. A vazão mínima em 2007 ficará em torno de 1,4 m³/s, a média em 2,0 m³/s e a máxima em 2,7 m³/s. Em 2017, a vazão mínima chegará a 2,1 m³/s, a média alcançará para 3,3 m³/s e a máxima para 4,5 m³/s. Segundo dados do Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES) da Agência Nacional de Águas (ANA), a ETE Onça está sendo concebida para atender uma população de 1.010.880 habitantes, o que equivale a uma vazão de aproximadamente 1.800 l/s. A carga orgânica abatida chegará a 32.753 kgDBO/dia. Segundo dados do PROSAB (2001, p.293), a faixa de eficiência de remoção de DQO de ETEs com sistema UASB-Lodos Ativados está entre 75 e 88%. Portanto, considerando a carga orgânica de 910 mil habitantes, a DQO removida em 2007 deve ficar entre 68.250 e 80.080 kgDQO/dia. A ANA, através do PRODES, investirá²⁶ na ETE Onça R\$12.636.000,00 em 3 anos. Estes custos se referem apenas à primeira etapa da construção, relativos aos reatores anaeróbios tipo USAB.

Para o pós-tratamento foram estudadas duas alternativas²⁸. A primeira por lodos ativados convencionais, a segunda com filtros biológicos percoladores (FBP). No processo de FBP não necessita-se de consumo de energia elétrica, e nenhuma potência é instalada. Por outro lado, a potência instalada no caso do sistema de lodos ativados será de 2500 CV em 2007, e 4300 CV em 2017. Esta potência é devida, principalmente, aos aeradores que fornecem oxigênio aos

²⁶ Em verdade tratam-se de recursos que não são investidos, mas RESSARCIDOS. Entretanto, este recurso é denominado investimento pela ANA, conforme Anexo II.

²⁷ Dados de projeto, fornecidos pelo Professor Eng.º Carlos A.L. Chernicharo (UFMG), em 13 de abril de 2004.

²⁸ Os valores unitários de cada processo foram obtidos da empresa de saneamento (COPASA) e de construtoras e consultores.

tanques de aeração. No sistema de FBP a aeração pode ser natural, sem consumo de eletricidade. O consumo previsto de eletricidade no sistema de lodos ativados é de 15.242.653 kWh em 2007, e 25.641.288 kWh em 2017. A razão entre consumo elétrico e kgDQO removida, considerando 80% de eficiência na remoção de DQO, será de 0,57 kWh/kgDQO_{remov} em 2007 e 0,54 kWh/kgDQO_{remov} em 2017. Outras demandas de eletricidade, comuns aos dois processos, não foram avaliadas.

A produção de metano relativo ao projeto da ETE pode ser estimada a partir da DQO removida no processo. Em 2007 a produção de metano será próxima de 8,0 a 9,3 milhões de m³ e em 2017 de 14,0 a 16,3 milhões de m³ de CH₄. Considerando que apenas 80% do metano pode ser recuperado, e que o um biogás com PCI de 5.000 kcal/Nm³, calcula-se a energia elétrica possível de ser gerada nesta ETE através de motores ciclo-Otto. Logo, em 2007 pode-se gerar cerca de 1.450 kW. Esta potência pode produzir 12,7 GWh por ano, ou seja, 85% do consumo previsto para 2007, de 15,2 GWh.

O volume de lodo produzido pelos dois sistemas de pós-tratamento não varia muito. No caso dos lodos ativados, projeta-se a produção de 86 m³/dia até 2007 e 144 m³/dia até 2017. Em termos de peso, isto equivaleria a 22.509 kg/dia de sólidos secos em 2007 e 37.723 kg/dia em 2017. No sistema de FBP, esta produção será de 76 m³/dia até 2007 e 127 m³/dia até 2017. Isto equivaleria em peso a 19.461 kg/dia de sólidos secos em 2007 e 32.478 kg/dia em 2017. Esta pequena diferença, entretanto, pode significar uma boa economia de energia no transporte do lodo ao longo do tempo.

3 – Avaliação das ETEs estudadas

A tentativa de analisar os resultados de operação de estações de tratamento à luz da teoria encontrou obstáculos, principalmente devido à escassez de dados. A existência de um órgão público que centralizasse as informações seria a melhor forma para resolver esta questão. Além disto, as próprias empresas solicitadas não dispõem de um sistema centralizado para prestar informações técnicas detalhadas e de qualidade. Os dados obtidos não foram verificados quanto a sua qualidade e confiabilidade.

A homogeneidade dos dados ficou prejudicada. Isto porque as empresas dispuseram diferentes qualidades de dados, fazendo com que a comparação de informações entre as estações ficasse limitada. Os dados obtidos nas estações visitadas (ETE Barueri, ETE Arrudas e ETE Santana) foram mais amplos e de melhor qualidade.

Entretanto, a obtenção do consumo de energia elétrica nas estações foi possível. Também foram obtidos dados de: eficiência de remoção das cargas orgânicas em relação a DQO, concentração inicial de DQO, concentração final de DQO e vazão.

A tabela 3.6, que se segue, resume alguns dados das quatro ETEs em operação analisadas. Além de dados sobre vazão, população atendida e cargas orgânicas removidas, encontram-se dados de consumo de eletricidade, produção de biogás, geração de lodo e custos.

Observa-se na tabela 3.6 duas ETEs que operam com sistema de lodos ativados (ETE Barueri e ETE Arrudas). A ETE Barueri tem vazão e carga orgânica (DQO) removida cinco vezes maior que a ETE Arrudas. O consumo de energia elétrica total da primeira ETE citada é bem superior, cerca de sete vezes. Deve-se lembrar que a ETE Barueri possui elevatória, enquanto a ETE Arrudas não. A produção de biogás na ETE Barueri é pouco mais de três vezes a da ETE Arrudas, e a produção de lodo da primeira é pouco maior que quatro vezes a da segunda.

Pode-se observar ainda na tabela 3.6 duas ETEs com sistemas anaeróbios (ETE Santana e ETE Ipatinga). Ambas possuem reatores tipo UASB. A diferença no consumo elétrico entre estas ETEs ocorre na elevatória de chegada, pois nenhuma possui pós-tratamento. Portanto, a eficiência energética das duas é diferente. A produção de biogás e lodo das duas está proporcional à carga orgânica (DQO) abatida. Observa-se que o custo operacional da ETE Barueri (lodos ativados) é 160% maior que o da ETE Santana (UASB).

Tabela 3.6: ETEs em operação

Características do processo	ETE	ETE	ETE**	ETE
	BARUERI	ARRUDAS	SANTANA	IPATINGA
Tratamento primário	Aeróbio	Aeróbio	Anaeróbio	Anaeróbio
Vazão (m ³ /s)	6,15	1,16	0,098	0,161
Habitantes	3.000.000	1.000.000	80.000	140.000
Carga orgânica abatida (kgDBO/dia)	115.000	20.328	n.d.	n.d.
Carga orgânica abatida (kgDQO/dia)	201.000	43.660	4.050	9.500
Consumo Total (kWh/mês)*	6.012.646	800.000	43.400	25.300
Custo eletricidade (R\$/mês)	545.000	160.000	12.212	n.d.
kWh/kgDQO removida*	1,00	0,62	0,34	0,09
biogás (m ³ /dia)	26.000	8.034	1.250	2.845
lodo (ton/dia)	230	52,0	0,7	1,79
Custo operacional (R\$/m ³)	0,13	n.d.	0,05	n.d.

*Consumo elétrico total inclui: bombeamento na estação elevatória, aeração, bombeamento de lodo, iluminação.

** Dados de Dezembro/2004

Fonte: Elaboração própria

Comparando-se o potencial de geração de eletricidade a partir do biogás na ETE Barueri, e o consumo de eletricidade desta ETE, observa-se um potencial de geração de 30,7% do consumo total da ETE. No caso da ETE Arrudas, a geração de eletricidade fica próxima a 62% do consumo total.

Para as estações com reatores tipo UASB, nota-se que esta relação é ainda maior. Na ETE Santana, a geração de eletricidade a partir do biogás pode produzir 170% da eletricidade consumida. Por sua vez, a ETE Ipatinga pode gerar quase 700% da demanda elétrica total desta ETE. Entretanto, a primeira possui estação elevatória, e a segunda não.

Por sua vez, a tabela 3.7, que se segue, resume alguns dados das ETEs em implantação estudadas. A ETE Piçarrão apresenta dados de projeto relativos ao ano 2020, enquanto a ETE Onça indica dados previstos para 2007. As duas ETEs são compostas por sistemas tipo UASB seguidos de lodos ativados. Apesar da vazão quase quatro vezes maior, a ETE Onça tem previsão de remover quase três vezes mais carga orgânica (DQO) que a ETE Piçarrão. A produção de biogás da ETE Piçarrão apresentada no projeto corresponde a 70% do volume teórico.

Tabela 3.7: ETEs em implantação

Características do processo	ETE PIÇARRÃO	ETE ONÇA
	Projeto p/ ano 2020	Projeto p/ ano 2007
Tratamento primário *	Anaeróbio	Anaeróbio
Vazão (m ³ /s)	0,56	2,0
Habitantes	250.000	910.000
Carga orgânica abatida (kgDBO/dia)	12.100	32.700
Carga orgânica abatida (kgDQO/dia)	20.000	72.800**
Consumo (kWh/mês)	n.d.	1.270.221
KWh/kgDQO removida	n.d.	0,57
Biogás (m ³ /dia)	4.800	17.200
Lodo (ton/dia)	10	22,5

*Ambas ETEs têm projeto de pós-tratamento por lodos ativados.

** Considerando a remoção de 80% da DQO afluente

Fonte: Elaboração própria

No caso da ETE Onça, a partir dos dados de projeto, calcula-se que a geração de eletricidade, utilizando o biogás produzido, poderá alcançar quase 100% da energia elétrica consumida em 2007 (próximo de 85% do consumo total).

Os resultados de eficiência das estações foram apresentados na unidade kWh/kgDQOremovida. Esta unidade considera o consumo elétrico total da ETE. O consumo total inclui, como foi apresentado no caso de Barueri, gastos no bombeamento inicial, aeração e recirculação de lodo e equipamentos elétricos. Os dados finais estão mostrados na tabela 3.8 e na Figura 3.4.

Tabela 3.8: Parâmetro de eficiência energética das ETEs estudadas

Parâmetro de eficiência	ETE BARUERI	ETE ARRUDAS	ETE SANTANA	ETE IPATINGA	ETE ONÇA ⁱⁱⁱ
kWh/kgDQO removida	0,70 ⁱ	0,62 ^{iv}	0,34 ⁱⁱ	0,09 ⁱ	0,57 ^{iv}

ⁱ Exclui consumo de energia elétrica na estação elevatória

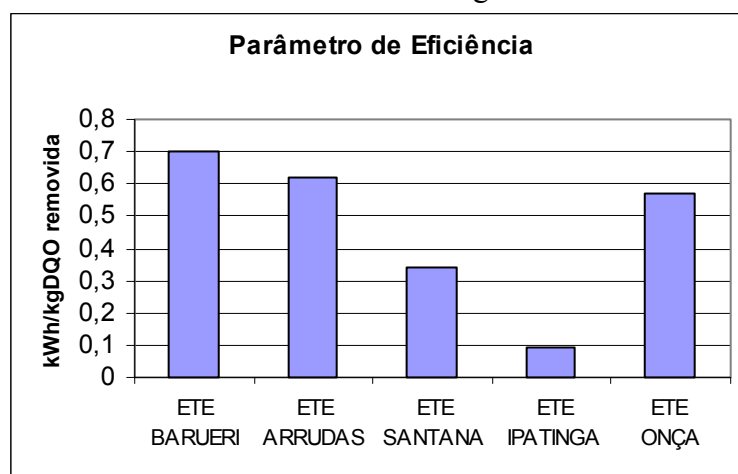
ⁱⁱ Inclui consumo de energia elétrica na estação elevatória (Valor de Dez/2004)

ⁱⁱⁱ Dados de projeto com pós-tratamento por lodos ativados

^{iv} Não possui estação elevatória

Fonte: Elaboração própria

Figura 3.4: Parâmetro de eficiência energética das ETEs estudadas



Fonte: Elaboração própria

Observa-se que as ETEs Barueri e Arrudas têm eficiência dentro da faixa teórica. A ETE Barueri tem consumo de 1,0 kWh/kgDQO removida, considerando o consumo total. Entretanto, seu consumo na aeração equivale à 50% do consumo total, e seu consumo na estação elevatória é de 30% do total. Logo, desconsiderando o consumo na elevatória, esta ETE tem eficiência de 0,7 kWh/kgDQO. Portanto, este valor está adequado à faixa de consumo energético deste tipo de sistema. A ETE Arrudas tem eficiência de 0,62 kWh/kgDQO removida. Esta ETE não possui elevatória de chegada, portanto, seu consumo elétrico na aeração está próximo ao total. Além disto, a ETE Barueri apresenta densidade de potência dos tanques de aeração inferior a da ETE Arrudas. A primeira apresenta um valor de 67 W/m³, enquanto na ETE Arrudas este valor é de 84 W/m³.

Os consumos elétricos teóricos mínimos dos sistemas de tratamento apresentados nos estudos de caso são mostrados na tabela 3.9, que se segue. Observa-se que os sistemas UASB e UASB + FBP não consomem energia para aeração. Os sistemas UASB + lodos ativados consomem entre 0,409 e 0,809 kWh/kgDQO removida. Por sua vez, os sistemas de lodos ativados convencional consomem entre 0,493 e 1,029 kWh/kgDQO removida.

Tabela 3.9: Consumo teórico de eletricidade por DQO removida em sistemas de tratamento.

Sistema de tratamento*	Consumo de eletricidade para aeração (kWh/kgDQOremovida)	
	mínimo**	máximo***
UASB	0,0	0,0
UASB + Filtro Biológico Percolador (FBP)	0,0	0,0
UASB + lodos ativados	0,409	0,809
Lodos ativados convencional	0,493	1,029

Fonte: Elaboração própria a partir de von Sperling (1991), ANEXO I; von Sperling (1996)

* Outros sistemas que consomem eletricidade para aeração são indicados no ANEXO II.

** Considerando uma produção de 29,2kgDQO/hab.ano e eficiência mínima de remoção de DQO do sistema

*** Considerando uma produção de 47,45kgDQO/hab.ano e eficiência máxima de remoção de DQO do sistema

As ETEs Santana e Ipatinga têm consumo elétrico menor que as duas primeiras, pois operam com reatores UASB. A ETE Onça, projetada para operar com sistema UASB seguido de lodos ativados, tem consumo previsto de 0,57 kWh/kgDQO removida. Este valor está adequando segundo a tabela 3.9, entre os limites de 0,40 e 0,80 kWh/kgDQO removida. Deve-se notar que os valores de eficiência energética dos estudos de caso incluem o consumo total da estação (bombeamento de lodo, aeração, estação elevatória, iluminação). Entretanto, a tabela 3.9 mostra apenas a eficiência relativa à aeração.

O ANEXO II apresenta valores teóricos de eficiência energética de vários sistemas de tratamento de esgoto. Comparando-se os sistemas da tabela do ANEXO II, observa-se que os sistemas com lodos ativados podem consumir uma elevada quantidade de eletricidade para remover um kg de DQO. Destacam-se como os de maior consumo os sistemas de lodos ativados convencional, de lodos ativados seguidos por aeração prolongada, de lodos ativados convencional com filtração terciária, de biofiltro aerado submerso com nitrificação e de lagoa aerada com mistura completa seguida de lagoa de sedimentação. Estes consomem mais de 0,9 kWh/kgDQOremovida para a aeração.

Capítulo IV – Avaliação das ações institucionais

O saneamento e a energia são exemplos de serviços essenciais à sociedade. Estes serviços integram interesses de diversos setores públicos. Para garantir sua adequada oferta, os órgãos públicos devem promover um planejamento consistente e eficiente, promovendo a integração de seus diversos setores. Existem barreiras para a implementação destes serviços. A estratégia em ambos os casos é criar políticas públicas que tentem contornar as barreiras econômicas, legais e técnicas de cada setor. Este capítulo analisa as políticas em saneamento e tenta identificar algumas ações institucionais direcionadas ao uso de tecnologias mais eficientes energeticamente para o tratamento de esgotos. Além disto, busca-se informações relativas às políticas de energia que promovam as fontes renováveis de energia, como é o caso do biogás.

1 – Políticas para o saneamento

É obrigação do Estado oferecer serviços de saneamento²⁹ em quantidade e qualidade que garantam a saúde e o bem estar do cidadão. Este serviço deve ser executado diretamente pelo Estado, ou através de concessão ou permissão (Abicalil, 2002).

As políticas públicas de universalização do saneamento devem ser direcionadas às áreas que concentram o déficit de cobertura. Nestas regiões vive a população mais pobre, nas periferias das grandes cidades, nos pequenos municípios, localidades e área rural, nas regiões menos desenvolvidas, no Norte e Nordeste. Para Abicalil (2002), alcançar a universalização do saneamento exige do Estado:

“[...] definir uma política de justiça distributiva e equidade, promovendo saúde, protegendo o meio ambiente e gerando condições propícias ao desenvolvimento cidadão e sustentável” (Abicalil, 2002, p.115).

A perspectiva do setor de saneamento é incerta. Falta a especificação de uma política nacional para o setor, assim como a definição do financiamento, da organização da prestação de serviços e da estrutura da regulação. Um longo debate tem ocorrido no congresso, e alguns consensos foram construídos, mas não se chegou a um entendimento sobre este setor. Uma das indefinições mais importantes é relacionada à titularidade de sistemas integrados (PMSS, 2002).

²⁹ Coleta, tratamento e abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto, coleta e destinação do lixo

Segundo o Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS, 2002), em 1993, o congresso aprovou um Projeto de Lei da Câmara com intuito de criar a Política Nacional de Saneamento. Entretanto, o PLC 199/93 foi integralmente vetado pelo Governo Federal. O debate prosseguiu e em 1996 foi criado o PLS 266/96, para ocupar o vazio existente na indefinição do setor. O debate girava em torno da titularidade do setor. O acirramento do debate ocorreu a partir do ano 2000. A tramitação do Projeto de Lei nº 4147/2001 e do seu Substitutivo, deixou mais claro os conflitos do setor, o que inviabilizou a votação de ambos, e a conseqüente paralisação da tramitação. Recentemente, o governo Lula tem trabalhado no desenho, planejamento e implementação de políticas públicas, que incluem o setor de saneamento. O Plano Plurianual 2004-2007 é um importante marco neste sentido.

De acordo com a política de governo, sintetizada pelo Plano Plurianual (PPA) 2004-2007 do Governo Federal, o saneamento tem um papel relevante na sua dimensão: social, econômica, regional, ambiental e democrática (PPA, 2005).

Na dimensão social do PPA, o saneamento deve fortalecer os direitos aos serviços sociais, universalizando seu acesso, com qualidade. O Saneamento faz parte da agenda maior, que visa criar condições de inclusão social de milhões de brasileiros que vivem em situação precária. Na dimensão econômica, a modernização do setor de saneamento contribuirá para o fortalecimento da infra-estrutura econômica. Os marcos regulatórios deste setor serão reavaliados ou implementados para impulsionar os investimentos. A tarifa, que afeta a população menos favorecida, será acompanhada pelo governo. Na dimensão regional, o país apresenta várias desigualdades em relação à infra-estrutura e à socioeconomia. A resolução de problemas sanitários em regiões menos favorecidas, além da inclusão social, diminui as assimetrias do desenvolvimento socioeconômico regional. Essa assimetria causa problemas sanitários tanto em regiões desfavorecidas quanto em regiões prósperas. As prioridades dos gastos da União, estados e municípios, num conjunto de políticas estruturantes devem articular o saneamento com outras áreas, visando sua convergência e o desenvolvimento local. Na dimensão ambiental, o saneamento adequado é imprescindível. São as áreas mais pobres que ficam mais expostas à poluição, áreas degradadas e doenças, com pouco acesso ao saneamento básico. A dimensão ambiental deve orientar as escolhas no campo social e econômico, pois o desenvolvimento econômico quase sempre resulta em degradação ambiental (PPA, 2005).

1.1 – Objetivo das políticas em saneamento

Para Abicalil (2002), existem quatro desafios básicos para a universalização dos serviços de saneamento. O aumento da oferta do tratamento de esgotos abrange estes desafios. Em primeiro lugar, as políticas do setor de saneamento devem ser direcionadas à população mais pobre. Além disto, devem ter em vista a diminuição da poluição dos recursos hídricos e a redução da incidência de doenças causadas pela falta de saneamento. Por sua vez, deve-se estimular a melhoria da eficiência do setor de prestação de serviço e o aumentar da eficácia das ações e transformação do atual quadro de fragilidade e indefinições institucionais.

As políticas voltadas à universalização do saneamento devem basear em princípios de justiça distributiva, democracia, eficiência das ações governamentais e respeito ao pacto federativo (Abicalil, 2002).

1.2 - Dificuldades encontradas para universalizar o tratamento de esgotos

A oferta de tratamento de esgoto para todos os domicílios do país encontra dificuldades comuns ao da universalização de todos os serviços de saneamento. As regiões com menor cobertura sanitária também apresentam menores níveis de renda. Isso reflete na maior dificuldade em pagar as tarifas de saneamento. Além disto, as menores cidades têm custos de implantação maiores, pois não apresentam economia de escala (Abicalil, 2002).

A falta de infra-estrutura em algumas áreas pode inviabilizar a implantação de redes de água e esgoto, e, conseqüentemente o adequado tratamento do esgoto. Desta maneira, deve-se prever a construção de vias com calçamento ou pavimento simultaneamente ao sistema de saneamento. A falta de vias apropriadas pode reduzir a vida útil destes sistemas.

A Constituição Federal não define objetivamente qual ente federado tem a responsabilidade de oferecer os serviços de saneamento, ou seja, a sua titularidade. Segundo Abicalil (2002), o tratamento de esgotos e outros serviços sanitários fazem parte do conjunto de serviços gerais do serviço público, que é descentralizado para os níveis regionais e locais de governo. Do ponto de vista jurídico, os serviços de saneamento são de caráter local, portanto são obrigações do município.

Entretanto, existem muitos casos de aglomeração de cidades em que a infra-estrutura deve ser compartilhada. Por exemplo, a captação de água para um município e a emissão de esgotos

deste município pode atingir recursos dos municípios vizinhos. Da mesma forma, existem situações em que o tratamento dos esgotos de um município deve ser feito fora dos seus limites geográficos. Estes casos ocorrem em regiões metropolitanas. Nestes casos o interesse pelo serviço é regional, pois envolve mais de um município. Porém, a titularidade destes serviços não está definida legalmente, o debate é complexo e existem argumentos legítimos defendendo posições diferentes. Segundo Abicalil (2002), dos 5.507 municípios brasileiros, 756 são atendidos com sistemas integrados, e sofrem com indefinição da titularidade, com conseqüências jurídicas e políticas variadas.

Em relação à participação da iniciativa privada no setor, Abicalil (2002) conclui que, na maioria destes casos, não existe “estrutura adequada de fiscalização” da prestação de serviços, ocorrem “sérios problemas judiciais” em relação ao serviço e as tarifas são revisadas pela empresas privadas, logo após a assinatura dos contratos.

De acordo com Abicalil (2002), os investimentos em serviços de saneamento dependem dos ciclos econômicos e do desempenho do setor público. O controle do déficit do setor público limita os investimentos no setor, que é de predomínio público.

1.3 - Estratégias para universalizar o tratamento de esgotos

Como parte dos serviços de saneamento, a ampliação do tratamento de esgotos para toda a população deve seguir estratégias comuns aos outros serviços.

Solucionar a crise fiscal das empresas de saneamento é uma estratégia citada por Abicalil (2002). Segundo ele, para solucionar este problema o governo deve primeiro aumentar os investimentos. Além disto, deve-se criar instrumentos de políticas distributivas direcionando subsídios aos mais pobres. Em terceiro lugar, deve-se melhorar a eficiência na prestação de serviços. Para melhorar sua eficiência, o serviço público deve criar formas de articulação entre os diversos órgãos, para não haver sobreposição de ações. A definição de responsabilidades na prestação do serviço deve ser clara, estabelecendo um ambiente de confiança e cooperação entre os prestadores. Por sua vez, a transferência da titularidade ao governo Estadual poderia solucionar estes casos, pois, os estados têm competência para criar, organizar e planejar regionalmente os serviços públicos.

1.4 – Programas de Saneamento

Os programas governamentais em saneamento apresentam objetivos e estratégias variadas. A análise destes programas contribui para esclarecer de que forma o tratamento de esgoto está sendo enfocado. Pretende-se também analisar se existem incentivos institucionais para a adoção de sistemas mais eficientes energeticamente. Por sua vez, deve-se verificar a existência de ações integradas entre os órgãos governamentais para a solução do déficit no serviço.

Entre os programas analisados estão: o Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR), o Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES), o Programa Saneamento Ambiental Urbano e o Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS).

1.4.1 - Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR)

Em 17 de Junho de 2004, foi lançado o plano de ação do Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR). Este plano pretende implementar medidas de conservação e uso eficiente de energia e água em sistemas de saneamento ambiental. O programa tem o apoio institucional do Ministério de Minas e Energia com a parceria do Ministério das Cidades (Eletrobrás, 11.04.2005).

A partir desta data, a Eletrobrás e operadoras de saneamento farão parceria para implementar projetos de conservação e uso racional de água e energia. Além disto, a Eletrobrás, conjuntamente a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária (ABES), promoverão ações para conscientizar e capacitar profissionais do setor em relação ao tema (Eletrobrás, 11.04.2005).

O PROCEL SANEAR tem cinco objetivos principais:

O primeiro é reduzir em 20% o consumo de energia elétrica do setor até o terceiro ano de implementação. O programa iniciou-se em 2004. O setor de saneamento consome 2,3% do total de energia elétrica gerada no país, isso significa sete bilhões de kWh/ano (MME). O consumo no horário de pico é significativo e os custos com energia elétrica são o segundo maior no setor.

O segundo objetivo é a elaboração e produção de guias técnicos, além da revisão dos já existentes. Estes guias devem conter informações sobre as tecnologias eficientes e procedimentos.

Outro objetivo é o de treinar e capacitar as equipes das empresas de saneamento e os consultores para facilitar a compreensão e assimilação de tecnologias e procedimentos que melhorem a eficiência do setor. Os agentes que trabalham em empresas de saneamento ambiental serão informados quanto às oportunidades e medidas de combate ao desperdício de energia e água no setor.

Esta sensibilização em relação ao tema de conservação de energia e água, com ênfase na eficiência energética, no setor de saneamento ambiental será feita através de publicações nos meios de comunicação da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), divulgação dos cursos e seminários nesta área, realização de 12 seminários e 10 cursos de capacitação em diversas regiões do país.

Finalmente, pretende-se apoiar projetos de demonstração e implementar aqueles consolidados, que utilizem novas tecnologias e equipamentos energeticamente mais eficientes. Estes projetos-piloto devem servir de exemplo para divulgar boas práticas de eficiência energética e uso racional de energia e água no setor. Segundo informa o MME, alguns foram selecionados em maio de 2004, por meio de chamada pública. A seleção visa criar intercâmbio de experiências, além de criar grupos especializados no assunto e contribuir para a modernização e universalização dos serviços de saneamento ambiental.

A integração deste programa com diversas instituições do Governo Federal resultam numa intensificação nas atividades de planejamento. Ainda não foram divulgados resultados específicos do programa em relação aos sistemas de tratamento de esgotos até o dia 11 de Abril de 2005.

1.4.2 - Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES)

O Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES), da Agência Nacional das Águas (ANA), tem como objetivo a redução das cargas poluidoras nos corpos d'água. Para viabilizar a implantação de estações de tratamento de esgoto (ETE), o PRODES concede estímulo financeiro aos Prestadores de Serviço de Saneamento que investirem em ETE, pagando pelo esgoto tratado. Cada empreendimento necessita cumprir com as condições

previstas em contrato para poder receber os recursos. A ANA financia 50% do custo de implantação da ETE, com base numa Tabela de Valores de Referência (ANA, 2005).

De acordo com os resultados alcançados pelo PRODES (ver ANEXO III), verifica-se a tendência de implantação de sistemas de tratamento de esgotos mais eficientes energeticamente. Observa-se que dos 2.188 litros por segundo contratados em 2003, 83% (1.816 l/s) eram de sistemas formados com reatores UASB. Entre estes sistemas destaca-se o da ETE Onça, um dos estudos de caso desta Dissertação, com vazão de 1.800 l/s. Não foi contratado nenhum sistema por lodos ativados. Este é um valor muito significativo em relação à viabilidade econômica dos reatores UASB. Em 2002 foram contratados 1.118 l/s. Destes, 74% eram de sistemas compostos por reatores do tipo UASB, ou seja, 823 l/s. Além disto, foram contratados 134 l/s em sistemas por lodos ativados sem reatores UASB. Foram contratados 626 l/s em sistemas do tipo UASB seguidos por lodos ativados, correspondendo a 56% do total. Entre os sistemas contratados pelo PRODES em 2002 está a ETE Piçarrão, que também se constitui em um dos estudos de caso desta Dissertação. Em 2001 foram contratados 3.618 l/s, Deste total, 50% eram sistemas com processos aeróbios e 50% com processos anaeróbios. Considerando o princípio do PRODES (comprar esgoto tratado), os sistemas com reator UASB estão apresentando vantagens econômicas significativas. De 2001 para 2003 a participação de sistemas anaeróbios nos contratos pelo PRODES cresceu de 50% para 83%. Não foi possível avaliar os resultados de 2004, pois estes ainda não foram disponíveis até a conclusão desta Dissertação.

1.4.3 - Programa Saneamento Ambiental Urbano

Este programa do Ministério das Cidades tem como objetivo ampliar e melhorar a qualidade do sistema de saneamento ambiental no país. Este programa também faz parceria com o Ministério da Saúde. As ações estão divididas em dois grupos. O primeiro grupo relaciona-se ao abastecimento de água e o segundo ao esgotamento sanitário. Por sua vez, o segundo grupo de ações engloba o tratamento de esgotos. Além disto, o programa visa melhorar a gestão das empresas prestadoras que participam do programa, incentivar a educação sanitária e ambiental, capacitar entidades ambientais e incentivar estudos direcionados para criação de políticas em relação a este setor. Este programa está direcionado a populações urbanas de baixo nível socioeconômico. Tem especial interesse pelos residentes de áreas sem infraestrutura, periferias de grandes centros ou pequenos municípios. Utiliza-se de recursos do Orçamento Geral da União (OGU), do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (FGTS), do

Fundo de Amparo ao Trabalhador (FAT) e de Fundos Internacionais. Os alvos deste programa são os municípios com população acima de 15 mil habitantes e cobrem ações de implementação de Estações de Tratamento de Esgotos. Os resultados deste programa ainda não foram disponibilizados pelo Ministério das Cidades até a conclusão desta Dissertação.

1.4.4 - Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS)

Criado em 1994, o Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS), do Ministério das Cidades, desenvolve trabalhos para auxiliar a tomada de decisão, o desenvolvimento de políticas e instrumentos na área de saneamento. O programa oferece aos vários níveis de governo, bases em informações consistentes e representativas sobre o setor.

O PMSS tem como objetivo auxiliar na implementação da nova Política Nacional de Saneamento Ambiental, beneficiando os formuladores de políticas públicas, os reguladores da prestação dos serviços, e também os prestadores públicos de serviço. Os recursos serão repassados sem ônus para a elaboração de estudo e trabalhos de consultoria técnica especializada. Estes estudos visam a:

“[...] implementação de políticas, a reestruturação da prestação de serviços, desenvolvimento de modelos de financiamento, incluindo estudos tarifários e sobre subsídios, estabelecimento de instrumentos e estruturas de regulação e controle, apoio ao desenvolvimento técnico, capacitação e disseminação, além de estudos e ações de caráter nacional” (Ministério das Cidades, 2004).

O programa conta com recursos do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BIRD), em acordo celebrado em 1999 para execução até 2007. Os resultados do PMSS forma publicados em uma série denominada “Modernização do Setor Saneamento”. Esta série é formada por manuais disponíveis na internet, na página do Ministério das Cidades. Os temas abordados refletem as questões consideradas mais relevantes sobre o setor. Entretanto, ainda não foram apresentados dados detalhados relativos ao consumo de eletricidade nas ETEs em operação.

2 - Políticas para energia renovável: Quais as chances do biogás?

Com a reestruturação do setor energético, o estado perde capacidade de intervir diretamente no mercado, transferindo a iniciativa de investimentos ao setor privado, e passa a atuar em funções políticas e de regulamentação do setor, e na correção das suas falhas. O molde regulatório atual cria condições para o setor privado financiar o empreendimento do seu

interesse, correndo riscos menores. Entretanto, em algumas questões de falha do mercado, existe a possibilidade da ação direta do Estado. Este é o caso da sustentabilidade energética³⁰, pois o mercado competitivo não incorpora nos seus custos os benefícios das fontes renováveis de energia, nem os impactos negativos das hidrelétricas ou dos combustíveis fósseis.

Neste contexto, estão sendo criadas estratégias em âmbito nacional, macro-regional e global para aumentar a participação das fontes renováveis na matriz energética mundial, com objetivo de ampliar a sua sustentabilidade, tendo em vista as dificuldades criadas pela privatização e desregulamentação do setor energético.

O debate sobre o uso das energias renováveis tem encontrado suporte em questões como a diminuição da dependência externa do petróleo, a diminuição da emissão dos gases de efeito estufa³¹, a geração distribuída de energia elétrica, a maior participação e controle social, a universalização do acesso à energia elétrica, a criação de sistemas isolados de fornecimento de eletricidade, a inserção das externalidades no custo final da energia. É relevante a discussão, no molde regulatório atual, das dificuldades e estratégias que estão surgindo para maior inserção das fontes de energias renováveis no país (Altomonte et al., 2003).

O biogás, por ser uma fonte renovável de energia, contribui positivamente para solucionar as questões apontadas acima. O uso do biogás produzido em estações de tratamento de esgotos deve ser incentivado pelas políticas voltadas às fontes renováveis de energia, tendo em vista a sustentabilidade energética do país.

2.1 - Potencial das fontes de energia renovável

Em termos gerais, as fontes de energia renováveis se baseiam em recursos que se renovam a partir da energia do sol, como por exemplo, a biomassa, a energia eólica, a energia hidráulica e a solar fotovoltaica ou térmica. Outros tipos de energias renováveis são a geotérmica e a maré-motriz.

De acordo com Bermann (2002), o país teria potencial de gerar 143.000 MW de energia elétrica utilizando energia eólica, 9.800 MW com pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), cuja

³⁰ Este termo, no contexto desta Dissertação, remete à idéia da ampliação do uso de fontes renováveis de energia buscando a melhoria de índices sócio-ambientais. Bermann (2002) apresenta índices que relacionam diferentes fontes energéticas com parâmetros socio-ambientais. A esse respeito vem em Bermann (2002) - "Indicadores de Sustentabilidade Energética".

³¹ Segundo Lexmond & Zeeman (1995), o uso de sistemas anaeróbios pode reduzir as emissões de metano e CO₂.

potência é menor que 30 MW cada, e mais 4.000 MW à partir da queima do bagaço de cana. Outras fontes de biomassa, utilizando madeira, resíduos agrícolas, óleos vegetais e álcoois, também são muito significativas. Deve-se ressaltar que o potencial para energia solar é “ilimitado”, tendo em vista a área e localização geográfica do país. De acordo com dados da ANEEL (2004), a potência de painéis fotovoltaicos instalados apresenta em torno de 15,0 MWp³².

Além disto, o biogás apresenta um potencial energético considerável. Com base no “Inventário anual de Emissões de Metano pelo Manejo de Resíduos” elaborado por Alves & Vieira (1998), calcula-se que o país tem uma capacidade real de geração elétrica a partir do biogás, considerando uma eficiência de conversão em 30%, de no máximo 370 MW a partir de resíduos sólidos, 200 MW a partir de esgotos domésticos e 250 MW a partir de efluentes industriais. Deve-se observar que o estudo de Alves & Vieira (1998) considera a emissão de metano relativa a apenas 10% do total de esgotos urbanos, pois, segundo Alves & Vieira (1998), esta era a fração de esgotos urbanos tratados no ano de 1994. O biogás também pode ser produzido a partir da decomposição anaeróbia dos dejetos da pecuária, entretanto, a criação confinada deve ser promovida para a viabilização do aproveitamento dos resíduos para a digestão anaeróbia.

Dados do programa de geração de energia através da biomassa (DOE biomass power program – 1996-2015), do departamento de energia do governo norte americano (DOE), informa que a biomassa naquele país tem um potencial de geração de 30.000 MW, sendo que 7.000 MW já estão implantados.

Na União Européia, um acordo para incentivar as fontes de energia renovável pretende alcançar uma meta de 12% de toda energia consumida em 2010, equivalente a 22% da eletricidade. Na Alemanha, existem 9.000 MW de geração eólica instalada, e este valor deve aumentar. A previsão é que em 2025 a energia eólica represente 25% do consumo elétrico deste país.

2.2 - Vantagens da energia de fontes renováveis

Quais são os motivos que levaram o país a adotar uma política energética de incentivo a estas fontes renováveis? Por um lado, o Brasil tem um privilegiado potencial para fontes renováveis. Este potencial poderia servir para muitos brasileiros gerarem sua própria energia,

³² Dados do Boletim Informativo da Geração (ANEEL, abril de 2004).

de forma descentralizada, e garantirem seu suprimento básico sem dependerem do mercado elétrico liberalizado. Pois, em alguns casos, o mercado liberal tem demonstrado sinais de incapacidade na garantia do fornecimento da eletricidade segura e com um preço justo.

A geração descentralizada pode baratear custos e facilitar a universalização do acesso à energia elétrica. Além disto, poderia criar uma cultura do uso de fontes renováveis que daria suporte à produção industrial e à pesquisa (Altomonte et al., 2003).

Por outro lado, o atual debate internacional com relação à mudança climática global poderá gerar oportunidade para o país, em conjunto com os outros países da América Latina e do Caribe, de obter benefícios e apoio para aumentar a participação das fontes renováveis em sua matriz energética (Altomonte et al., 2003).

O Brasil está aderindo a uma crescente demanda internacional pela substituição da energia de origem fóssil. Esta substituição visa conter o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e, conseqüentemente, a mudança climática global. Para Capriles (2003), além de serem instrumento de geração de empregos no Brasil, as energias renováveis possibilitarão o aproveitamento econômico dos insumos locais e de desenvolvimento regional descentralizado e poderão contribuir para ampliar a base tecnológica e industrial do País.

Na Europa, segundo Finon (1996), o debate sobre adoção da energia renovável é justificado por três questões gerais: dependência de combustíveis fósseis importados, diminuição da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) e integração energética da União Européia (UE). Com respeito à primeira questão apontada, em 1996 a União Européia importava 80% do seu petróleo, 40% do gás natural e 33% do carvão. As incertezas de fornecimento destes combustíveis têm feito com que a UE altere as suas estratégias. A segunda questão é em relação à diminuição da emissão de gases de efeito estufa, que causam mudanças climáticas globais. Muitos investimentos foram feitos para diminuir as emissões de sulfatos, provenientes das térmicas a carvão; entretanto, é o debate sobre as mudanças climáticas que tem criado maiores resistências quanto ao uso de fontes que emitem gases de efeito estufa. Segundo Matthes & Timpe (2000), a EU é responsável por 20% das emissões globais de CO₂, e 25% dos Gases de Efeito Estufa (GEEs) emitidos pelo conjunto dos países industrializados. Além disto, a emissão de CO₂ pelo setor elétrico da EU corresponde a 30% do total. Finalmente, a terceira questão está relacionada à integração do mercado energético da comunidade européia. Além das três questões abordadas anteriormente, Matthes & Timpe

(2000) acrescentam que a energia nuclear não aparece com alternativa energética devido aos riscos de desastre, geração de lixo radioativo e contaminação radioativa permanente na cadeia de produção.

2.3 - Dificuldades encontradas para inserir as fontes renováveis

A atual tentativa de inserção das energias renováveis na matriz energética brasileira encontra dificuldades, que também são comuns a vários países da América Latina e dos chamados países em desenvolvimento. Entre sucessos e falhas, várias são as formas de explicação dos fatos. Altomonte et al. (2003) afirma que existem três tipos de barreiras para a inserção das fontes renováveis: a econômica, a financeira e a política.

Ele afirma que a dificuldade de concorrência com as fontes fósseis dentro de um mercado liberalizado, principalmente na geração de eletricidade, é a maior barreira econômica. A barreira financeira está ligada à falta de regulamentação clara para diminuir os riscos e incentivar o investidor privado a financiar as fontes renováveis. O autor afirma que a recente desestruturação do setor energético em vários países tem dificultado esta inserção. Trata-se de uma possível incompatibilidade entre as vertentes que defendem a privatização do setor elétrico daquelas que defendem a ampliação das fontes renováveis, presentes no atual debate energético internacional. A última barreira para Altomonte et al. (2003), a política, refere-se à dificuldade de definir a extensão que o governo pode intervir no setor, caso isto seja necessário. Mesmo sendo esta uma prioridade política, o governo deve estudar se os custos de intervenção são menores que os de não intervenção, antes de agir. Caso a ação governamental seja necessária, deve-se buscar apoio político formando coalizões com todos os segmentos sociais engajados nos objetivos da proposta de intervenção. Entretanto, este autor também conclui que as experiências recentes têm demonstrado a complexidade e a dificuldade para se motivar as autoridades políticas em implementar programas deste tipo, nos países da América Latina e Caribe.

Com a recente reestruturação do setor energético o Estado transfere à iniciativa privada grande parte das suas atribuições, e isso tem dificultado uma maior inserção das fontes de energia renováveis. Esta reforma ocorreu em vários países simultaneamente e em diferentes intensidades. Segundo Altomonte et al. (2003), dentro das medidas adotadas no setor pode-se destacar três grupos. O primeiro, diz respeito a medidas que afetam o status legal e o direito de propriedade das empresas. O segundo refere-se às que alteram a organização da cadeia

produtiva. O último grupo refere-se a medidas que determinam as funções dos novos atores e regulam as atividades de subsistemas de geração. Além disto, a introdução de mecanismos de mercado necessita da criação de um marco regulatório e institucional através de um complexo processo, e cria regras e funções no setor. O molde regulatório cria leis estabelecendo o modelo institucional, cria regulações determinando os direitos e obrigações dos atores, desenvolve instrumentos para garantir preço e investimentos, e estabelece formas de garantir legalmente o cumprimento das regras.

Com a privatização e a desestruturação do setor, o Estado perde controle direto e exclusivo do acesso aos investimentos em geração, transmissão e distribuição, que são os três principais processos da cadeia produtiva do setor. Além disto, para criar maior competição, estes três principais processos da cadeia produtiva devem ser segmentados verticalmente e horizontalmente, e o acesso à transmissão deve ser irrestrito aos geradores. Isto dificulta a formulação de políticas energéticas mais amplas e mais sólidas, pois não existe a facilidade da integração vertical das ações. Portanto, o Estado somente poderá agir indiretamente para influenciar a cadeia produtiva, através da oferta e demanda geral ou através de instrumentos fiscais com subsídios e taxas para modificar os preços. Isto poderia encarecer o custo da energia, que seria repassado para o consumidor final. Por outro lado, existe a possibilidade de intervenção direta do Estado onde os mecanismos de mercado falham, especialmente na área de políticas ambientais. Segundo Altomonte et al. (2003), os mecanismos de mercado são impróprios onde existem muitas externalidades, onde as transações tiverem custos altos e onde for difícil garantir a propriedade privada exaustiva. Nestes setores existe a possibilidade de implementar políticas para energias renováveis e eficiência energética.

2.4 - Estratégias para inserção das fontes renováveis de energia

Dentre as diversas propostas para a inserção das fontes renováveis, deve-se observar qual delas permite um melhor aproveitamento de todos os benefícios e vantagens das fontes renováveis, citados anteriormente. Quais seriam as possibilidades de uma maior cooperação entre os países? Da transferência tecnológica? Do maior incentivo interno à pesquisa e desenvolvimento desta tecnologia? Do maior e mais rápido crescimento destas fontes?

Segundo Altomonte et al. (2003), algumas medidas são consideradas como necessárias para viabilizar políticas em fontes renováveis e eficiência energética. Em primeiro lugar, deve-se separar as ações e instrumentos políticos para o uso em questões de energias renováveis das

usadas para a eficiência energética. Além disto, deve-se integrar os instrumentos regulatórios destas políticas dentro da política nacional de energia. Deve-se também, estabelecer prazos para a obtenção de resultados em um horizonte de médio prazo. Finalmente, deve-se aproveitar de acordos internacionais existentes em mudança climática e fontes renováveis de energia.

Muitos programas de incentivo a energias renováveis e eficiência energética na América Latina tiveram apoio ou foram criados por agências de cooperação internacionais. Altomonte et al. (2003) não tem dúvida que os maiores programas de incentivo à eficiência energética na América Latina (ex: CONAE no México e PROCEL no Brasil) não teriam sido criados, ou não teriam o mesmo porte, se não houvesse uma contribuição substancial dos bancos multilaterais. Entre estes bancos e agências estão o Banco Mundial e o BID, programas como o ESMAP, o programa ALURE da comissão europeia e cooperações bilaterais. Um exemplo de projeto que “falhou” seria o do Mercado Sustentável para Energias Sustentáveis, financiado pelo BID. Outras iniciativas, como a do Fundo Ambiental Mundial (WEF), investem em: eficiência energética de diferentes setores, eletrificação rural com energias renováveis e projetos pilotos.

Além destes projetos de cooperação, existe uma expectativa que, com a entrada em vigor do Protocolo de Quioto, alguns mecanismos flexíveis poderão promover significativamente as fontes de energia renováveis e os projetos de eficiência energética. O mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL), criado pelo protocolo de Quioto, reconhece medidas de redução de emissões de gases de efeito estufa em país em desenvolvimento. As reduções de emissão destes gases são transformadas em créditos e podem ser comercializadas no mercado de créditos de carbono. O mercado de crédito de carbono poderá contribuir com recursos adicionais aos projetos que reduzirem a emissão de gases que causam o efeito estufa. Por outro lado, não se pode garantir que o mercado de crédito de carbono irá incentivar, por si só, políticas energéticas que busquem a melhoria dos índices de sustentabilidade energéticas³³.

O protocolo de Quioto, no artigo 4.5, cria ainda a necessidade das nações que o aderiram de tomar atitudes no sentido de promover, facilitar e financiar a transferência de tecnologias que contribuam para reduzir a mudança climática. Este seria o caso das tecnologias para produção de energias renováveis ou para eficiência energética. Este mecanismo de transferência de

³³ Para informações sobre índices de sustentabilidade energética, ver Bermann (2002) - “Indicadores de Sustentabilidade Energética”.

tecnologias pode ser uma importante estratégia para viabilizar as fontes renováveis, mas existem dificuldades. Entre as principais barreiras, destaca-se a dificuldade de acesso ao capital, dificuldades institucionais e administrativas dos governos, pouco acesso à informação. Além destas, pouco incentivo de empresas privadas para divulgar gratuitamente a sua tecnologia, e a descontinuidade da geração elétrica das fontes renováveis são outras barreiras encontradas. Em todas as conferências das partes (COP), foram tomadas decisões favoráveis à implementação do artigo 4.5. Mas foi durante a COP4, em Buenos Aires, com a instalação de um “processo de consulta” sobre transferência tecnológica, que este tema ganhou um novo impulso. Na COP6, as partes chegaram a um acordo em relação ao assunto, denominado *Bonn Agreements on the Implementation of the Buenos Aires Plan of Action*. Este acordo inclui temas-chave de desenvolvimento e transferência tecnológica. Já na COP7, os acordos de Marrakech estabelecem a criação de um grupo de especialistas em transferência de tecnologias, EGTT, que tem o objetivo de ampliar a implantação do artigo 4.5 da convenção, facilitar as atividades de transferência de tecnologias e fazer recomendações ao Conselho de Ciência e Tecnologia (SBSTA). Muitos debates estão sendo promovidos e muitos trabalhos escritos têm fornecido informações e idéias significativas em torno desta questão. Cinco temas são considerados pelo artigo 4.5, que envolvem além da criação do Grupo de Especialistas em Transferência Tecnológica (EGTT), o desenvolvimento de uma metodologia para quantificar a necessidade tecnológica dos países; a criação de um centro que agregue informação sobre transferência tecnológica (TT:CLEAR), inclusive formando uma rede de centros de informação tecnológica; a formulação de ações por parte dos governos que crie um ambiente propício para uma maior eficiência na transferência tecnológica e a promoção de formação humana e institucional para ampliar a transferência tecnológica. Estas ações teriam o financiamento de um fundo especial da convenção de mudanças climáticas. Resta esperar para saber se os mecanismos de implementação superarão as barreiras encontradas.

De qualquer forma, a cooperação entre os países latino-americanos, em relação ao desenvolvimento de estratégias comuns de políticas energéticas sustentáveis, é um bom caminho para fortalecer o intercâmbio de experiências no âmbito regional. Este caminho poderá ser criado a partir da Iniciativa Latino-Americana e Caribenha para o Desenvolvimento Sustentável, que foi aprovada durante o primeiro encontro especial do Fórum de Ministros de Meio Ambiente da América Latina e do Caribe, durante a Cúpula Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável de 2002 em Johannesburgo.

Como consequência da Iniciativa Latino-Americana e Caribenha para o Desenvolvimento Sustentável, que considera a importância das ações regionais e subregionais para a promoção do desenvolvimento sustentável, foi realizada em Outubro de 2003 a Conferência Regional da América Latina e Caribe sobre Energias Renováveis, sediada em Brasília. Esta conferência fez parte do processo de fortalecimento e definição de estratégias regionais preparatórias para a Conferência Internacional sobre Energias Renováveis que foi realizada em Junho de 2004 em Bonn, na Alemanha. Também é um desdobramento das decisões da Coalizão de Johannesburgo para Energias Renováveis, criada durante a Conferência de Johannesburgo, com participação de 70 membros, incluindo o Brasil.

Um dos resultados da conferência regional em Brasília foi um documento denominado “Plataforma de Brasília sobre Energias Renováveis”. Esta Plataforma delimita as seis principais contribuições positivas das fontes de energia renovável para a região. Entre elas: a diminuição da pobreza, a diversificação da matriz com aumento na segurança de suprimento, diminuição do risco associado à variabilidade hidrológica, geração descentralizada de energia, aumento da base tecnológica e industrial do país e a universalização do acesso à energia elétrica.

A Plataforma de Brasília traz algumas diretrizes políticas no setor energético para o desenvolvimento sustentável. Estas propostas são uma tentativa de cumprir o plano de ação definido em Johannesburgo e a proposta da Iniciativa Latino-Americana e Caribenha para Energias Renováveis, em relação a contribuições regionais para aumentar a parcela destas fontes na matriz energética mundial, e reconhecem a contribuição da coalizão de energias renováveis de Johannesburgo para a mobilização dos países de todas as regiões do mundo em relação a este assunto.

Entre as propostas cria-se um compromisso de que o uso de energias renováveis na região corresponda a, pelo menos, 10% de toda a demanda de energia em 2010. Este compromisso será implementado voluntariamente, considerando as diferentes situações dos países. A cooperação entre os países da região e os países desenvolvidos será fortalecida, em prol do crescimento econômico, da proteção ambiental e da equidade social. Outra proposta é a busca de formulação de políticas públicas de longo prazo para garantir a implantação de fontes renováveis de energia. Esta deve estar de acordo com os moldes regulatórios dos países, que devem orientar para a total e efetiva integração na matriz energética, além de incentivar investimentos do setor privado. Além disto, deve-se buscar cooperação com o setor produtivo

para aumentar o conhecimento do setor de energias renováveis e estimular a adoção destas tecnologias para garantir sua competitividade com as outras fontes. Em sexto lugar, pede-se que os benefícios sócio-ambientais das fontes renováveis sejam incorporados nos moldes regulatórios e institucionais. Outra proposta sugere que as experiências de adoção e implantação de políticas para incentivar as energias renováveis sejam intercambiadas entre os países da região e de outras regiões. Além desta, deve-se desenvolver recurso humano para difundir a tecnologia, refinar pesquisas e projetos, capacitar para instalação e manutenção de equipamentos, além de valorizar o treinamento do usuário final.

A nona proposta sugere que a troca de experiências aplicadas de moldes regulatórios para o desenvolvimento das fontes renováveis fornecerá dados para a comparação entre elas e fortalecerá a sustentabilidade dos moldes regulatórios atuais. Outra proposta determina que seja dado um forte apoio à proposta de criação de um fundo de cooperação técnico e financeiro, entre os países industrializados e a América Latina e Caribe, para o desenvolvimento tecnológico, e que permita a redução dos custos e aumente os investimentos em fontes renováveis de energia.

Além de exigir financiamento das instituições financeiras a projetos em energias renováveis, devem-se criar novos mecanismos para encorajá-los, inclusive a formação de mercado de Certificados Verdes e de Créditos de Emissão de Carbono e programas de incentivos tarifários, com base nas externalidades positivas das energias renováveis e negativas das fontes fósseis. Outras propostas são a formulação de políticas públicas para encorajar o desenvolvimento do mercado de energias renováveis, considerando as necessidades sociais das camadas pobres dos países, e buscando soluções economicamente viáveis para alcançar o patamar social expresso na Declaração do Milênio das Nações Unidas e na Iniciativa Latino-Americana e Caribenha para o Desenvolvimento Sustentável. Deve-se fazer estudos para comparar a distribuição descentralizada de energia com a centralizada e avaliar periodicamente o progresso de implementação desta Plataforma.

Durante a Conferência Regional foi decidido que a Comissão Econômica para a América Latina (CEPAL) fará um estudo atualizado da situação das energias renováveis na região, para ser apresentado durante a Conferência Internacional sobre Energias Renováveis de 2004. A CEPAL dará suporte para os países da região durante o evento, e depois, na implementação dos acordos alcançados durante o debate.

São vários os temas a que foram discutidos e os objetivos a serem atingidos durante a conferência internacional sobre energias renováveis. A questão principal da conferência foi: Como aumentar substancialmente a proporção das energias renováveis usadas nos países industrializados e nos em desenvolvimento, e como se beneficiar melhor de suas vantagens e potencialidades? Os principais temas da conferência estão relacionados à formulação de moldes regulatórios que permitam o desenvolvimento do mercado de energias renováveis, o aumento do financiamento público e privado para garantir uma demanda constante por energias renováveis, a formação de pessoas e instituições e coordenação e intensificação da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico. Entre as questões, deve-se formular uma declaração política, descrevendo os objetivos políticos em comum, tendo em vista uma maior participação das energias renováveis em um sistema energético mais eficiente e sustentável. Outro aspecto é a formulação de um plano de ação internacional, indicando propostas de atores e governos para ações concretas ou compromissos voluntários, para o desenvolvimento das fontes renováveis de energia. Finalmente, deve-se criar um guia de boas políticas, para indicar exemplos de estratégias políticas de maior impacto e maior coerência.

2.5 – Programa de Incentivo de Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA)

Considerando a contradição da incapacidade do mercado de introduzir maior participação das fontes renováveis na matriz e os compromissos assumidos internacionalmente pelo país em relação a estas fontes, como isto se resolveria? Qual seria a opção do estado na implantação de políticas para as fontes renováveis? Quais interesses seriam conflitantes a este? E em que condições isto seria viável?

Algumas respostas para as perguntas acima podem ser encontradas a partir das formulações de políticas públicas no setor. A opção adotada pelo estado pode ser analisada a partir da criação do Programa de Incentivo de Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA, que foi aprovado pelo congresso em 26 de abril de 2002, através da lei nº 10.438 e revisado pela lei nº 10.762 de 11 de novembro de 2003.

O programa tem o objetivo de diversificar a matriz energética através do incentivo a fontes alternativas de energia. O PROINFA cria um complemento à sazonalidade da geração hidrelétrica. A geração de energia a partir dos ventos ocorre fora do período chuvoso da região Nordeste. Por sua vez, a oferta de biomassa, nas regiões Sul e Sudeste, é maior no período inverso ao de chuvas. Além disto, o programa visa aumentar a confiabilidade e

segurança na oferta de energia. Na sua versão revisada, o programa cria mecanismos para que a energia seja produzida pelo maior número de estados, valoriza a tecnologia nacional e exclui consumidores de baixa renda do pagamento do rateio da energia nova (Bermann, 2005).

Na versão original e revisada, a implantação do PROINFA deverá ocorrer em dois estágios. No primeiro, prevê-se a introdução de 3.300MW de geração a partir de fontes renováveis até dezembro de 2006. Esta geração será contratada para servir o Sistema Interligado Nacional (SIN). Entre as fontes renováveis definidas no programas encontra-se a geração eólica, a biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). Além disto, os geradores emitirão uma quantidade de Certificados de Energias Renováveis, proporcional a sua produção de energia.

O sistema deve ser operado pela Eletrobrás, que comprará toda a energia gerada a um custo pré-estabelecido. Os contratos da Eletrobrás com os geradores com fontes renováveis terão duração de 20 anos, para a geração que iniciar a operação antes de 2007. Finalmente, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) criou um programa especial de financiamento de até 70% dos custos de cada projeto de fonte renovável cobrando juros baixos, segundo os critérios do PROINFA.

A ELETROBRÁS fica responsável pela definição dos valores e pela comercialização da energia proveniente das fontes alternativas contempladas pelo PROINFA. Estes valores são o resultado da consulta pública realizada pelo Ministério de Minas e Energia. O resultado deste processo definiu dos valores pagos para geração das três fontes, conforme indicado na tabela 4.1. Em relação à biomassa, foram divulgados os custo da energia entre R\$ 93,77 e R\$ 169,08 por MWh, conforme o tipo de combustível utilizado. Observa-se que este programa definiu o preço do biogás a partir de estudos relativos a aterros sanitários. Após esta etapa, as empresas interessadas em ingressar no programa mandaram suas propostas.

Tabela 4.1: Valores Econômicos do PROINFA

Central geradora de energia elétrica	Valor Econômico da Tecnologia Específica da Fonte (em R\$/MWh)	
PCH		117,02
Usina de Energia	Valor máximo	204,35
Eólica	Valor mínimo	180,18
Usinas Termoelétricas a Biomassa		
Bagaço de Cana		93,77
Casca de Arroz		103,2
Madeira		101,35
Biogás de aterro		169,08

Fonte: MME (2005)

O resultado dos projetos habilitados pelo programa está indicado em ANEXO IV. Entretanto, observa-se que nenhum projeto de geração a partir de biogás foi contratado.

Parte do aumento na tarifa de energia elétrica será destinada a chamado “Fundo de Desenvolvimento Energético”, para custear o sistema de subsídios e incentivos para as fontes renováveis. Além disto, o preço da energia elétrica para o consumidor final, depois de inserir os custos das energias renováveis, não deve superar em 0,5% do preço considerando apenas os custos das fontes convencionais. Esta restrição dificulta a ampliação do uso de fontes renováveis no país (Bermann, 2005). Deve-se observar que o custo repassado ao consumidor final brasileiro pode ficar três vezes maior que o custo estimado pelo programa alemão.

Cabe ressaltar que a seleção dos projetos de geração tem uma lista de critérios. Os projetos serão ordenados considerando a data da emissão da sua licença de instalação (LI), assim, aquele que tiver a licença mais antiga tem prioridade. Outro critério utilizado é a prioridade do produtor independente autônomo (PIA) em relação ao produtor independente de energia (PIE). De acordo com o Guia, um produtor independente de energia elétrica é autônomo (PIA):

“[...] quando sua sociedade, não sendo ela própria concessionária de qualquer espécie, não é controlada ou coligada de concessionária de serviço público ou de uso de bem público de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica, nem de seus controladores ou de outra sociedade controlada ou coligada com o controlador comum” (Guia de Habilitação PROINFA - Biomassa).

Além disto, cada estado poderá concorrer, no primeiro instante, ao máximo de 220 MW por fonte renovável, ou 20% do total. É importante dizer que, se o potencial máximo de 1100 MW não for atingido pelos PIA, será complementado pelos PIE. Outro ajuste será feito se o total não for atingido e um estado tiver mais que 220 MW. Neste caso, o montante restante será rateado considerando a proporção dos potenciais de geração de todos os estados. Outra chamada pública pode, caso a meta não tenha sido atingida.

No segundo estágio do PROINFA, que se inicia após a implantação dos primeiros 3.300 MW de capacidade de geração com fontes renováveis, estava previsto como objetivo da versão original, gerar 10% da eletricidade consumida anualmente utilizando as três fontes de energia

renovável, no prazo de 20 anos. Entretanto, o “Novo Modelo do Setor Elétrico” não inclui esta meta de 10% (Bermann, 2005).

A iniciativa brasileira de incentivo a fontes alternativas pode ser considerada um grande passo na direção do incentivo a fontes renováveis. Sua implantação foi resultante de esforços e iniciativas internas e externas, especialmente da Comunidade Européia, para ampliação de fontes renováveis na matriz energética do país. Além disto, a ONU considerou que o PROINFA é elegível para obter créditos de carbono no mercado internacional. O mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL), criado pelo protocolo de Quioto, reconhece medidas de redução de emissões de gases de efeito estufa em países em desenvolvimento. As reduções de emissão destes gases podem ser comercializadas no mercado de créditos de carbono. Aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de CO₂ por ano poderão se transformar em créditos devido às emissões evitadas da geração contratada pelo programa. Esta estimativa inicial foi apresentada pela Unicaf, e amplia ainda mais o incentivo ao programa.

Deve-se lembrar que o PROINFA veio à tona durante a crise de fornecimento de energia elétrica no país em 2002. O Brasil é um bom exemplo de como a situação pode se transformar rapidamente, devido a uma crise de oferta de energia. Isto indica que sua função inicial seria de responder de forma imediata, improvisada e pontual a uma questão estrutural. Destaca-se que o programa não se beneficia da eventual vantagem de geração distribuída a partir destas fontes, pois toda eletricidade gerada é injetada nas redes de distribuição de energia elétrica (Bermann, 2005). Passada a crise, o programa ainda encontra várias dificuldades para sua implantação definitiva. A existência simples de uma lei para energias renováveis não garante que o programa e suas medidas correspondentes serão implementados. A consolidação do programa depende da construção de uma base sólida para política energética, capaz de garantir a introdução das fontes renováveis na matriz energética. Portanto, deve-se observar cuidadosamente os próximos passos da implantação deste programa, que ocorrerá com a assinatura e execução dos contratos.

3 - Desenvolvimento sustentável?

Uma das estratégias ambientais do Governo Federal, apresentado no PPA, é o desenvolvimento sustentável de longo prazo. Frente às pressões que o desenvolvimento econômico impõe ao meio ambiente, as decisões nesta área devem ser orientadas para reduzir o seu impacto nos recursos naturais e nos serviços ambientais. O Governo considera que:

“[...] os compromissos de justiça social com as gerações atuais são indissociáveis do legado que se quer deixar às gerações futuras”. Desta forma, apresenta-se como objetivo: *“[...] o desenvolvimento voltado para justiça social, integrando igualmente o direito a um ambiente saudável”*. Entretanto, o que se observa são pessoas socialmente menos favorecidas vivendo em ambientes poluídos. Segundo o PPA: *“Os principais problemas que ameaçam nossos ecossistemas demonstram a estreita relação entre degradação ambiental e degradação social”*. Ao analisar o contexto, pergunta-se: O que está sendo feito para resolver a situação?

O objetivo de prover um ambiente limpo com equidade social é contraditório ao modelo atual de desenvolvimento? De que forma os sistemas de tratamento podem contribuir para solucionar a questão? Como viabilizar o uso do biogás de ETEs? Deve-se buscar um novo paradigma de desenvolvimento? Qual seria a alternativa ao atual modelo?

É freqüente o uso do discurso do desenvolvimento sustentável por aqueles que defendem a universalização do serviço de saneamento e a ampliação da geração por fontes renováveis de energia, sem abrir mão do atual modelo de desenvolvimento.

Sachs, W. (2000) afirma que existe uma contradição intrínseca no termo, pois nenhum desenvolvimento pode ser sustentável. Por sua vez, Sachs, I. (2002) acredita que a economia poderá inserir todo o custo ambiental nos produtos poluentes, apesar das dificuldades de quantificar estes custos.

O fato é que o déficit em saneamento ainda não foi solucionado, apesar do amplo conhecimento técnico. Além disto, o crescimento econômico dos últimos 200 anos, baseado em combustíveis fósseis, tem sido responsável pelo crescente desequilíbrio ambiental, e não tem sido capaz de inserir o custo destas externalidades a ponto de reverter este quadro de degradação.

Nem as fontes renováveis de energia têm conseguido competir com as fontes fósseis, pois em um mercado liberal só se consideram os custos médios de implantação e geração, e não as externalidades. Entretanto, o aumento da geração de energia de forma ilimitada, mesmo que utilizando fontes renováveis, pode se tornar insustentável. Além disto, ainda existe a questão social, pois se por um lado o atual modelo de desenvolvimento gera uma constante dependência tecnológica dos países em desenvolvimento em relação aos desenvolvidos, também não diminui o quadro social precário e injusto por não criar empregos no país. Esta tendência pode ser verificada observando o reduzido número de empresas e equipamentos

nacionais participando do mercado de fontes renováveis, bem como reduzido incentivo para a pesquisa nesta área. A questão que fica é: Se o incentivo às energias renováveis define um caminho para um novo paradigma de desenvolvimento, qual é este paradigma?

Qual o objetivo do Estado quando regula a tarifa de saneamento ou apóia a ampliação da participação das energias renováveis na matriz? Estaria o Estado protegendo um bem comum, em benefício de todos, ou estaria ele apenas criando mais um mercado para o benefício de poucos e a reprodução do capitalismo?

Para Bobbio (1987), o Estado significa um “ambiente” de superação das contradições da sociedade civil. Logo, cabe ao Estado o papel de regular as falhas do mercado em relação ao meio ambiente. Em relação à questão ambiental, o Estado também pode atuar para que o mercado incorpore suas externalidades negativas. Além disto, o Estado deve agir para resolver os problemas de desemprego, falências e inflação, causas de graves tensões sociais. Segundo Bobbio (1987), o estado pode resolver suas contradições mediante um processo gradual e pacífico. Para ele, devido à predominância da sociedade de massas, o exercício democrático na atualidade encontra várias dificuldades. Mas ele não considera que esse exercício seja impossível. Para que o governo seja democrático, Bobbio (1987) diz que o poder deve estar irradiado por toda a sociedade, representando interesses pluralistas, enquanto o estado representa o ponto de encontro da diversidade e do embate das forças mediante as quais se dará o pacto social. Esta democratização deve abranger toda a vida social, incluindo educação, trabalho, lazer, vida doméstica. Para Sachs (2002), o Estado estaria atingindo critérios de sustentabilidade se: i) exercesse uma democracia definida em termos de apropriação universal dos direitos humanos; ii) desenvolvesse capacidade para implementar um projeto nacional envolvendo todos os empreendedores; e, iii) existisse um nível razoável de coesão social. Desta forma, a universalização do saneamento ou a inserção das fontes renováveis deveria ser resultado de um amplo e democrático debate nacional, ou seja, considerando-se as opiniões dos diversos atores. Observando-se as opiniões acima, aparentemente, não seria esta a proposta explícita do programa de incentivo às fontes renováveis no Brasil.

Offe et al. (1984), porém, acreditam que o Estado, além de não superar as contradições da sociedade civil, somente existe para perpetuá-las. Portanto, apesar de aparentemente visar o bem comum, o Estado está a serviço apenas do bem estar da sua elite, que domina os meios de produção, em detrimento da classe sem propriedades. Segundo a concepção neoliberal,

caberia ao Estado apenas subsidiar o setor de saneamento ou criar um molde regulatório que viabilizasse as fontes renováveis de energia através de incentivos para o investidor público e privado. Este mercado deve ser regulado, para reduzir os riscos de investimento, e conseqüentemente os custos, enquanto a classe dominante se apropriaria do lucro. O preço a ser pago seria definido pelo mercado. É isto que vem sendo feito no âmbito PROINFA, pois os investidores submetem o preço, que foi solicitado através de uma “consulta pública”, feita pela Eletrobrás. Algo semelhante ocorre no PRODES. Primeiro, porque o programa compra o esgoto tratado a um preço definido pelo investidor, garantindo sua margem de lucro. Segundo, porque ao definir quais projetos serão contratados, o programa forma um caixa com o valor total do investimento, reduzindo seu risco. Desta forma, o investidor pode usar a garantia de pagamento para obter empréstimos a “juros menores”.

De acordo com a perspectiva de Offe (1984), o Estado não está a serviço e nem é “instrumento” de uma classe contra a outra, mas impõe e garante regras duradouras, para institucionalizar as relações de classe, típicas da sociedade capitalista de classes. Aparentemente, a implantação do PROINFA não desrespeita nenhuma das quatro determinações funcionais do Estado definidas por Offe (1984, p.123). Em primeiro lugar, os projetos de geração elétrica com energias renováveis serão organizados pela iniciativa privada, e seus lucros serão apropriados da mesma forma. O governo obterá, através dos impostos, parte do volume dos recursos da acumulação privada. Como o estado não é capaz de organizar a produção, mas depende dos impostos, ele cria um molde regulatório, que segundo Offe (1984), mantém “*as condições de exteriorização do seu poder através da constituição de condições políticas que favoreçam o processo privado de acumulação*”. Por último, o estado depende da legitimação democrática, e para obtê-la exerce o poder em consonância com as preferências do público eleitor, que parte do princípio da acumulação continuada. Portanto, Offe (1984) acredita que:

“[...] o exercício do poder através dos mecanismos democrático-representativos da formação das vontades e da regulamentação dos conflitos tem o sentido, no contexto do Estado constitucional burguês, de assegurar de forma politicamente duradoura a delimitação da esfera privada e da esfera de liberdade econômica, de forma a defender essa esfera de liberdade de possíveis intrusões por parte do Estado” (Offe, 1984, p.124).

Portanto, quando o Estado se propõe a resolver conflitos ou contradições em relação às esferas sociais e ambientais, ele o faz de forma a garantir a esfera privada e a esfera de liberdade econômica. Segundo Bermann (1991) os conflitos no setor elétrico são vistos na crescente polarização em relação aos impactos sócio-ambientais causados pela geração, principalmente a hidrelétrica, onde os interesses das populações atingidas pelos empreendimentos não são reconhecidos pelos empreendedores. Além disto, a própria formação do setor elétrico nacional está caracterizada pelo controle de poucas empresas (monopólios), e mostra o caráter intrinsecamente autoritário, centralizador e antidemocrático do setor.

O fato é que historicamente o Estado tem apresentado inúmeras justificativas para se intrometer na vida dos cidadãos. Para Sachs (2000), alguns objetivos como “lei e ordem” ou o “bem-estar pela distribuição de riquezas” têm sido motivos recorrentes de intervenção. O desenvolvimento tem sido uma meta de vários governos do Terceiro Mundo, e tem sacrificado necessidades vitais de grande parte da população. Finalmente, a “sobrevivência do planeta” também caminha na direção das metas acima, *“tornar-se uma justificativa indiscriminada para nova onda de intromissões do estado nas vidas das pessoas em todo o mundo”*. Se por um lado os ambientalistas focalizam inúmeros pontos fracos da natureza, por outro os governos encontram uma área cheia de conflitos, que necessita de governo e regulação. Portanto, os serviços da natureza precisam ser observados, e as ações da sociedade devem ser controladas, para que a espoliação ocorra de forma “tolerável”. O novo papel do estado será produzir provas do “estado da natureza” e os “efeitos da ação do homem”, editar normas e leis determinando um novo comportamento, e impor obediência às novas regras. Portanto, criam-se sistemas de monitoramento, mecanismos de regulação e órgãos executores. Uma nova classe de profissionais será necessária. Os peritos, que antes presidiam o desenvolvimento, agora garantem a própria sobrevivência da vida! Entretanto, a atuação do Estado tem criado constantes conflitos com as comunidades tradicionais, que vivem da subsistência e reconhecem a natureza como um ser vivo, sem usar métodos científicos. De qualquer forma, vê-se o Estado assumindo uma nova função, ou seja, a nova razão do estado torna-se defender a “sobrevivência do planeta”.

Capítulo V – Conclusões e recomendações

Este trabalho tem com motivação inicial os problemas relativos ao baixo índice de saneamento no país e na idéia de melhoria da eficiência energética deste setor. Iniciou-se pelo estudo das tecnologias aeróbias e anaeróbias, na busca de esclarecimento em relação às suas vantagens energéticas para o tratamento de esgotos. As questões abordadas foram relativas ao consumo de eletricidade e produção de metano, em relação à remoção de matéria orgânica do esgoto. Os resultados teóricos foram avaliados através de seis estudos de caso. A partir das constatações relativas à eficiência energética dos sistemas de tratamento, buscaram-se informações sobre programas governamentais que incentivassem estas vantagens.

As conclusões são apresentadas a partir dos resultados da análise dos programas governamentais em saneamento e energias renováveis. Em seguida, apresentam-se as conclusões relativas aos estudos de caso. Por fim, são apresentadas as conclusões referentes à análise energética dos processos aeróbios e anaeróbios.

5.1 - Conclusões

A pesquisa sobre os programas governamentais nas áreas de saneamento e energia renovável iniciou-se pela busca de informações nos órgãos públicos através da internet. O objetivo foi analisar as políticas em saneamento e tentar identificar algumas ações institucionais direcionadas ao uso de tecnologias mais eficientes energeticamente para o tratamento de esgotos. Outro objetivo desta parte da pesquisa foi obter informações relativas às políticas de energia que promovem as fontes renováveis de energia, no caso deste estudo, o biogás.

A busca de informações sobre os programas governamentais em energias renováveis encontrou uma baixa disponibilidade, qualidade e atualidade de dados oficiais disponibilizados pela rede. O mesmo foi verificado em relação aos programas de saneamento relativos à eficiência energética no tratamento de esgotos.

Os objetivos apontados pelos programas para a universalização do saneamento sugerem um cuidado maior às populações menos favorecidas do país, um zelo maior ao meio ambiente e uma integração de diversos órgãos públicos para a melhoria da prestação do serviço à população. Da mesma forma, as políticas em energias renováveis visam garantir ao cidadão o direito à energia e ao meio ambiente saudável.

Em ambos os casos, as principais barreiras encontradas foram relativas à viabilidade econômica do serviço. Isto demonstra a ênfase, ou até dependência, nos interesses mercadológicos para aumentar o acesso da população aos serviços mencionados. Além disto, deve-se destacar a baixa autonomia do setor público. Suas dificuldades de investimento em programas públicos estão ligadas à crescente liberalização da economia e o desmonte do Estado. Observa-se também, a partir do contexto, que o mercado neoliberal não tem sido eficiente na viabilização do tratamento de esgotos, no investimento em eficiência energética ou no uso do biogás.

Desta forma, a criação de uma política para o uso do biogás ou o incentivo ao tratamento do esgoto depende do incentivo econômico feito pelo setor público ao mercado. Entretanto, observando-se os objetivos relativos a implantação de saneamento (tratamento de esgotos) e uso de energias renováveis (biogás), apresentados pelos programas governamentais, verifica-se que representam interesses bastante distintos do mercado. Se por um lado o setor público pretende melhorar as condições de vida da população mais carente e diminuir os impactos ambientais, o mercado, por sua vez, visa apenas obter o maior lucro possível.

O que se observa é o Estado apresentando garantias de compra de esgoto tratado (no caso do PRODES) e de energia elétrica de fontes renováveis (no caso do PROINFA), visando atender a redução do risco de investimento imposta pelo mercado.

Os programas analisados evidenciaram um maior estímulo governamental aos serviços de saneamento relacionados ao abastecimento de água e à coleta de esgotos. O aumento na oferta de tratamento de esgoto depende de investimentos nestes serviços. Os programas governamentais voltados à eficiência energética no setor de saneamento evidenciaram um maior estímulo na diminuição das perdas de água e no racionamento do seu uso. Além disto, existem ainda ações voltadas à conscientização e treinamento dos operadores do setor em relação à eficiência energética. Estes aparentam ser os primeiros passos do setor público em busca da melhoria de eficiência na prestação de serviços.

Observa-se que o PROCEL SANEAR cria interação de diferentes setores governamentais, criando condições para uma melhor articulação dos interesses públicos. O Programa Saneamento Ambiental Urbano também apresenta estas características de integração entre órgãos públicos. Entretanto, o PRODES e o PMSS não fazem integração formal com outros

setores públicos. A articulação de ações entre setores governamentais deve representar uma melhoria no uso do dinheiro público.

Nota-se que os resultados apresentados pelo PRODES entre 2001 e 2003 indicam uma vantagem econômica relativa aos sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos. A vazão contratada relativa a sistemas com participação de reatores anaeróbios foi de 1.797 l/s em 2001, 823 l/s em 2002 e cresceu para 1.816 l/s em 2003. A participação relativa dos sistemas anaeróbios, em termos de vazão contratada, cresceu de 50% em 2001 para 74% em 2002; e em 2003 subiu para 83%. Destaca-se que a maioria dos sistemas anaeróbios contratados tem a participação de reatores UASB. Neste programa, o setor público dá garantias de compra do serviço ao longo do funcionamento da estação de tratamento, garantindo o lucro do investidor e a redução dos riscos (juros) do investimento. Desta forma, conclui-se pela tendência de implantação de sistemas anaeróbios, especialmente de reatores UASB.

Por sua vez, o programa voltado para o uso de fontes renováveis de energia não contratou a geração elétrica a partir do biogás de ETEs. Ou seja, o estímulo ao uso do biogás para fornecer energia elétrica não é suficiente. Apesar disto, o programa viabilizou a contratação de 3.300 MW de outras fontes de energia renováveis. A viabilização deste programa deve-se, em grande parte, aos esforços diplomáticos para melhorar a sustentabilidade energética mundial e a participação do Brasil em acordos e tratados internacionais neste sentido.

A eficiência energética, dos sistemas de tratamento de esgoto, e sua produção relativa de biogás foram analisadas a partir de seis estudos de caso. As ETEs estudadas foram: ETE Barueri, ETE Arrudas, ETE Santana, ETE Ipatinga, ETE Piçarrão e ETE Onça. Buscou-se dados relativos a sistemas de alta-taxa com processo aeróbios e anaeróbios. A obtenção de dados, dos prestadores de serviço, sobre a operação das ETEs foi dificultada pela fragmentação da informação entre os setores que cuidam da energia e o que cuidam da operação dos processos biológicos. A verificação da qualidade dos dados obtidos foi impossibilitada devido à baixa quantidade de dados disponibilizados. Em alguns casos, a morosidade e a burocracia também dificultaram a pesquisa. Desta forma, a melhor estratégia de obtenção de dados foi o da visita a campo. Foram visitadas três ETEs: ETE Barueri, ETE Arrudas e ETE Santana. Por sua vez, a receptividade dos operadores nas ETEs foi de muita boa vontade.

Todas as ETEs apresentaram dados relativos à remoção de matéria orgânica e consumo total de energia elétrica. Na ETE Piçarrão e Onça foram obtidos os dados de projeto.

A ETE Barueri foi a única estação que apresentou dados de consumo de energia elétrica separados entre os seus processos, também foi a única que apresentou dados relativos à eficiência energética do sistema e de medição de produção do biogás. Isto demonstra o baixo interesse dos outros prestadores de serviço em relação à questão energética. Conforme apresentado no trabalho, o cálculo da eficiência energética das ETEs indicou uma melhor eficiência dos sistemas com processos anaeróbios. O índice de eficiência calculado, dado em kWh/kgDQOremovida, foi comparado com valores teóricos de eficiência na aeração, e todos os sistemas obtiveram resultados dentro dos limites teóricos. Os valores de eficiência energética das ETEs estudadas foram apresentados na tabela 3.8 do item 3 (Avaliação das ETEs estudadas), Capítulo 3.

Tabela 3.8: Parâmetro de eficiência energética das ETEs estudadas

Parâmetro de eficiência	ETE BARUERI	ETE ARRUDAS	ETE SANTANA	ETE IPATINGA	ETE ONÇA ⁱⁱⁱ
kWh/kgDQOremovida	0,70 ⁱ	0,62 ^{iv}	0,34 ⁱⁱ	0,09 ⁱ	0,57 ^{iv}

ⁱ Exclui consumo de energia elétrica na estação elevatória

ⁱⁱ Inclui consumo de energia elétrica na estação elevatória (Valor de Dez/2004)

ⁱⁱⁱ Dados de projeto com pós-tratamento por lodos ativados

^{iv} Não possui estação elevatória

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que estes valores são referentes ao consumo total de cada ETE. No caso da ETE Barueri, sua eficiência é de 1,00 kWh/kDQO removida, considerando o consumo elétrico total. Porém, 50% do consumo elétrico é relativo aos tanques de aeração e 30% relativo à estação elevatória. Logo, sua eficiência é de 0,70 kWh/kgDQOremovida desconsiderando a estação elevatória e de 0,5 kWh/kgDQOremovida considerando apenas o consumo na aeração. Esta e a ETE Arrudas apresentam valores de eficiência dentro dos limites teóricos para sistemas de lodos ativados convencional (0,493 e 1,029 kWh/kgDQOremovida). No caso da ETE Onça, sua eficiência está dentro dos padrões relativos ao sistema UASB seguido de lodos ativados (0,409 e 0,809 kWh/kgDQOremovida). As ETEs Santana e Ipatinga não apresentam consumo elétrico na aeração, logo seu consumo é relativo a outros usos, pois, elas apresentam apenas reatores UASB.

Em relação ao biogás, apenas a ETE Barueri apresentou dados relativos a sua produção real. Entretanto, as outras estações não fazem a medição da vazão de biogás. O volume de biogás

(metano) produzido nas ETEs foi calculado a partir da remoção de matéria orgânica (DQO) e do tipo de processo biológico (aeróbio e anaeróbio). Observa-se que a produção de biogás na ETE Barueri chega a 26.000 m³/dia. O valor calculado para as outras ETEs foram: 8.000 m³/dia na ETE Arrudas, 1.250 m³/dia na ETE Santana, 2.845 m³/dia na ETE Ipatinga, 4.800 m³/dia na ETE Piçarrão e 17.200 m³/dia na ETE Onça. Logo, a geração de biogás nas ETEs é bastante significativa.

Comparando-se o biogás gerado e a população atendida pelos sistemas, verifica-se que a ETE Baruari gera 8 litros de biogás por habitante por dia (litros/hab.dia). Na ETE Arrudas, a produção também é de 8 litros/hab.dia. Por sua vez, a ETE Ipatinga produz 20 litros/hab.dia e na ETE Santana, 18 litros/hab.dia. Já na ETE Piçarrão, esta produção é de 10 litros/hab.dia. Observa-se que a geração de biogás por habitante é significativamente maior nas duas ETEs com reatores UASB.

O uso do biogás está restrito a alguma aplicação na ETE Barueri. A ETE Ipatinga não apresentou informação de uso do biogás e nas ETEs Arrudas e Santana queima-se o biogás em *flare*. Esta queima significa o desperdício de um recurso natural renovável. Desta forma, foram pesquisados usos para o biogás de ETEs. A geração de energia elétrica utilizando-se o biogás como combustível pode ser feita através de motores ciclo-Otto acoplados a geradores. A partir desta tecnologia, calculou-se a potência de geração de cada ETE e sua respectiva produção elétrica mensal e comparou-se ao consumo elétrico mensal.

Desta forma, observa-se um potencial de geração de 30,7% do consumo elétrico total da ETE Barueri a partir do biogás da mesma. Enquanto a ETE Barueri apresenta medição real de biogás, nas outras a vazão de biogás foi calculada. Na ETE Arrudas, pode-se gerar 62% do consumo total de eletricidade. Nas estações anaeróbias esta relação foi ainda mais favorável. Na ETE Santana, esta geração produz 170% da eletricidade consumida. Por sua vez, na ETE Ipatinga a geração de eletricidade equivale a quase 700% da demanda elétrica total desta ETE. Por sua vez, a ETE Onça pode produzir cerca de 85% da eletricidade consumida. Conclui-se que os sistemas anaeróbios podem atingir uma maior autonomia energética se comparados aos sistemas aeróbios.

Por sua vez, a melhor eficiência energética dos processos anaeróbios foi pesquisada a partir de conceitos elementares. Desta forma, compararam-se os processos aeróbios e anaeróbios em

relação a suas características metabólicas e ao funcionamento dos ecossistemas, para obter informações sobre suas demandas energéticas.

Pesquisaram-se os tipos de reatores biológicos e suas características, para obter informações sobre suas eficiências energéticas. Observa-se que os reatores de baixa carga são um dos mais baratos e consomem pouca energia. Entre os reatores de alta-taxa, o UASB destaca-se pelo baixo custo de implantação e operação, além de não consumir eletricidade. Este reator pode formar sistemas acompanhando diversos tipos de reatores, para melhorar a eficiência na remoção de matéria orgânica. Por sua vez, os sistemas de lodos ativados são um dos que consomem mais eletricidade, além de terem um dos maiores custos. Desta forma, conclui-se pela maior eficiência energética dos reatores UASB, além de serem um dos mais baratos.

Analisando-se as informações obtidas, apresentou-se o balanço energético de cada processo biológico. A comparação teórica entre os processos biológicos apresenta uma significativa vantagem energética favorável ao processo anaeróbico. Conforme apresentado no texto, o processo aeróbio consome, em média, o equivalente a 860 kcal em energia elétrica para aeração e 2100 kcal de energia química da matéria orgânica, para estabilizar um kg de DQO. Considerando que o conteúdo energético médio de um kg de DQO equivale a 3.300 kcal, este processo consome 64% da energia química da matéria orgânica. Por outro lado, o processo anaeróbico consome entre 600 e 900 kcal por kg de DQO metabolizada. Neste caso, o processo anaeróbico utiliza entre 18 e 27% da energia química contida em um kg de DQO.

Desta forma, a energia contida nos produtos dos processos anaeróbios é maior que nos processos aeróbios. A energia que sai na forma de metano escapa do meio líquido formando o biogás. Este biogás, que é uma fonte de energia renovável, é produzido apenas nos sistemas anaeróbios. Considerando-se a mesma quantidade de DQO removida, observa-se que a quantidade final de biogás produzido em reatores UASB é maior que o gerado na digestão anaeróbia do lodo dos processos aeróbios.

Por sua vez, o volume de lodo produzido pelo processo aeróbio é bem superior ao do processo anaeróbico. Para metabolizar um kgDQO o processo biológico produz 315 gSSV, este valor é de 150 gSSV nos processos anaeróbios. Esta expressiva redução contribui para a economia de energia no transporte do lodo.

Além disto, a economia equivalente em energia elétrica do processo anaeróbio é de 1kWh por kg de DQO removida. Portanto, o processo anaeróbio contribui para reduzir o consumo de eletricidade do sistema, melhorando sua eficiência energética.

5.2 - Recomendações

Considerando os resultados obtidos, recomenda-se criar incentivos institucionais para viabilizar estações de tratamento de esgotos mais eficientes energeticamente.

Recomenda-se o uso de ferramentas de planejamento energético para decidir sobre a implantação de sistemas de tratamento de esgotos e uso do biogás.

Recomenda-se a criação de políticas que integrem a ampliação do tratamento de esgotos com a eficiência energética e o desenvolvimento de tecnologias para o uso do biogás das ETEs. Estas ações devem ser acompanhadas por vários órgãos governamentais simultaneamente, desde que cada um enfoque em um aspecto de seu interesse. Desta forma, cada investimento governamental deve viabilizar vários objetivos em diversas áreas do interesse público (saúde, energia, educação, saneamento).

Por sua vez, recomenda-se que o acesso às informações governamentais seja maior. O cidadão tem direito à informação de qualidade para acompanhar e fiscalizar os gastos do setor público. O governo deve criar meios para a participação do cidadão na formulação de políticas públicas, incentivar a democracia participativa e a cidadania.

Além disto, recomenda-se a implantação de sistemas de medição relativos ao consumo de energia elétrica em cada etapa dos processos das ETEs em operação e a vazão de biogás em todas ETEs em operação. Estes dados devem ser disponibilizados através de um banco de dados criado para a centralização das informações.

Recomenda-se a criação de mecanismos que possibilitem a injeção de pequenas cargas no sistema elétrico, haja vista que o PROINFA não contratou geração de baixa carga.

Recomenda-se que os ganhos econômicos provenientes do uso do biogás sejam convertidos em investimentos em saneamento.

Recomenda-se ainda, que estudos sejam realizados relacionando às dificuldades encontradas pelo governo para viabilizar programas em saneamento (tratamento de esgoto) e energias renováveis (biogás) à reestruturação neoliberal do setor público nos últimos anos.

Recomenda-se utilizar a ferramenta de Planejamento Integrado de Recursos (PIR) para verificar a viabilidade econômica da adaptação de ETEs pouco eficientes por outra mais eficiente energeticamente.

Finalmente, recomenda-se a análise de ciclo de vida de sistemas de tratamento para estudar o consumo energético durante toda a vida útil do empreendimento.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABICALIL, M.T. Uma nova agenda para o saneamento. In: **O Pensamento do Setor de Saneamento no Brasil: Perspectivas Futuras**. Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano (SEDU/PR). Presidência da República. Dezembro, 2002.
- AL TOMONTE, H; COVIELLO, M; LUTZ, W.L. **Renewable energy and energy efficiency in Latin America and the Caribbean: constraints and prospects**; Serie: recursos naturales e infraestructura, CEPAL, Santiago, Chile, October 2003, disponível em: <http://www.eclac.cl/>
- ALVES, J.W.S; VIEIRA, S.M.M. **Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de Resíduos**: Enabling Brazil to fulfill its commitments to the United Nations Convention on Climate Change. Julho, 1998.
- BERMANN, C; CABRAL Jr., W; SINISGALLI, P; TORRES, A. **Análise da viabilidade técnica e ambiental de AHEs no Sudoeste de Goiás** – Relatório final, fevereiro de 2005.
- BERMANN, C. **Energia no Brasil: Para quê? Para quem?** Crise e Alternativas para um país sustentável. FASE, São Paulo, 2002.
- BERMANN, C. **Os limites dos aproveitamentos energéticos para fins elétricos**: uma análise política da questão energética e de suas repercussões sócio-ambientais no Brasil, Tese de Doutorado – FEM/UNICAMP. Campinas, 1991.
- BOBBIO, N. **Estado, Governo, Sociedade: para uma teoria geral da política**. Rio de Janeiro, Ed. Paz e Terra, 1987.
- BORGES, E.S.M; GODINHO, V.M; CHERNICHARO, C.A.L **Thermal hygienization of excess anaerobic sludge: a possible self-sustained application of biogas produced in UASB reactors**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.
- BORGES, E.S.M. **Tratamento térmico de lodo anaeróbio a partir da queima do biogás produzido em reator UASB objetivando a higienização e a melhoria da disponibilidade e biodegradabilidade da fração orgânica**. 2004. 254p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.
- CAPRILES, R. **Brasília 2003 – Bonn 2004**: O futuro das energias renováveis, Revista ECO21, Edição 84, Novembro de 2003
- CENBIO. **Geração de energia elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto**. Convênio N° 2001.1.141.4.9 – USP/IEE/CENBIO – SABESP. Relatório técnico final. São Paulo, Junho de 2004.
- CHERNICHARO, C.A.L. Fundamentos da digestão anaeróbia. In: _____. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 1997. p.23-78.
- CHERNICHARO, C.A.L. Sistemas anaeróbios de tratamento. In: _____. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 1997. p. 97-122.
- COMPARINI, J.B. **Estudo do decaimento de patógenos em biossólidos estocados em valas e em biossólidos submetidos à secagem em estufa agrícola**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- COPASA. **Relatório mensal da estação de tratamento de esgoto Santana, Varginha – MG**, 2005.

DAVID, A.C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio.** 2002. 151p. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

FINON, D. The Future of EU Energy Policy. In: **European Energy Policy in a Changing Environment.** Heidelberg, Physica-Verlag, 1996.

GOTAAS, H.B. **Composting, Sanitary Disposal and Reclamation of Organic Waste.** World Health Organization, 1956.

LEXMOND, M.J. & ZEEMAN, G. **Potential of controlled anaerobic wastewater treatment in order to reduce the global emissions of the greenhouse gases methane and carbon dioxide.** Wageningen. Agricultural University of Wageningen. Maio, 1995.

MATTHES, F.C. & TIMPE, C. **Sustainability and the Future of European Electricity Policy.** Berlin: Ed. By the Heinrich Boell Foundation, 2000.

OFFE, C. Teses sobre a fundamentação do conceito de Estado Capitalista e sobre a pesquisa política de orientação materialista. In: **Problemas Estruturais do Estado Capitalista.** Rio de Janeiro, pg.122-137. Ed. Tempo Brasileiro, 1984.

OLIVEIRA, S.O. et. al., **Energia e Desenvolvimento.** ADESG-MG, Belo Horizonte, 1979.

PAUSS, A; NAVEAU, H; NYNS, E.-J. Biogas production. In: HALL, D.O., OVEREND, R.P. **Biomass.** Brisbane: Wiley-Interscience publication, 1987. p. 273-291.

PROSAB (Programa de pesquisa em saneamento básico). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.** Belo Horizonte, 2001.

PROSAB (Programa de pesquisa em saneamento básico). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** Capítulo 10: Tratamento de gases gerados em reatores anaeróbios, p.249-270. Rio de Janeiro, 1999.

ROMERO, J.F.L. **Avaliação do processo de licenciamento ambiental das usinas termoelétricas a gás natural no estado de São Paulo.** Dissertação de Mestrado. PIPGE/USP, São Paulo, 2004.

SABESP (1997), **Custos operacionais de estações de tratamento de esgoto por lodos ativados:** Considerações sobre a ETE Barueri. Eng.^o Américo de Oliveira Sampaio e Eng.^a Maria Carolina Gonçalves.

SABESP (2002), **Custos de operação e manutenção da ETE Barueri.** UNIDADE DE NEGÓCIO DE TRATAMENTO DE ESGOTO – AE, DIVISÃO DE OPERAÇÃO OESTE

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável,** Rio de Janeiro, Ed. Garamond, 2002.

SACHS, W. **Dicionário do Desenvolvimento. Guia para o conhecimento como poder.** Editora Vozes. P 117 – 131, 2000. disponível em: <http://www.icb.ufmg.br/~beds/andreazouri.htm>

SAWYER, C.L; McCARTY, P.L; PARKIN, G.F. **Chemistry for environmental engineering.** Caracas: McGraw-Hill, Inc., 1994.

United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC. **ISSUES IN THE NEGOTIATING PROCESS: Development and Transfer of technologies:** consultative process. Updated 20th August 2003, disponível em: <http://unfccc.int/issues/technology.html>

van HAANDEL, A.C; LETTINGA, G. **Anaerobic Sewage Treatment: A practical guide for regions with a hot climate.** Chichester: John Wiley & Sons, 1994.

von SPERLING, M. **Características típicas dos principais sistemas de tratamento de esgotos**. 2001.

von SPERLING, M. Características das águas residuárias. In: _____. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: UFMG, 1995. p.51-92.

von SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Vol. 2. Princípios básicos do tratamento de esgoto. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1996. 211 p.

von SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Vol. 4. Lodos Ativados. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1997. 416 p.

BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA:

ARCEIVALA, S.J. (1981, apud von SPERLING, 1995). **Wastewater treatment and disposal**. Marcel Dekker, New York, 1981. 892 p.

CAMPOS, J.R.(1994, apud von SPERLING, 1995). **Alternativas para tratamento de esgotos – pré-tratamento de águas para abastecimento**. Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, no.9, 112 pp.

HULSHOF, P. Waste characteristics & factors affecting reactor performance 1: Process factors, waste characterization and pH related toxicity. In: **International course on anaerobic treatment**. Wageningen Agricultural University / IHE Delf. Wageningen, 17-28 Jul 1995.

IENO, G. (1993 apud Romero, 2004) **Estudo preliminar da viabilidade técnica e econômica da usina termoeletrica de Piratininga em Ciclo Combinado**. Dissertação de mestrado. PIPGE/USP, São Paulo, 1993.

LETTINGA, G; HULSHOPPOL L.W. & ZEEMAN, G. (1996, apud CHERNICHARO, 1997). **Biological Wastewater Treatment**. Part I: Anaerobic wastewater treatment. Lecture Notes. Wageningen Agricultural University. Ed Janeiro de 1996.

McCARTY (1990, apud van HAANDEL, 1994, p.27) = McCARTY, P.L. **Modeling of anaerobic processes**. Presented at the IAWPRC Workshop on Anaerobic Treatment of Wastewater, Valladolid, Spain.

METCALF & EDDY, inc. (2001, apud DAVID, 2002) **Wastewater Engineering: treatment, disposal, and reuse**. 3^aed. McGraw-Hill. 2001.

SPEECE, R.E. (1986, apud CHERNICHARO, 1997). **Proc. EWPCA Conf. Anaerobic treatment, a grown-up technology**. Setembro 1986, Amsterdam, 205 p.

TSUTIYA, M.T. (2000, apud CAMPERINI, 2001). Alternativas de disposição final de bio sólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: _____, **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgotos**. BETTIOL, W; CAMARGO, O.A. eds. Jaguariúna: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p.69-103.

TSUTIYA, M.T. (2001, apud DAVID 2002) Características de bio sólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: **Bio sólidos na agricultura**. Capítulo 4. Sabesp, Escola Politécnica – USP, ESALQ – USP/Nupegel, UNESP – Jaboticabal. São Paulo, 2001.

TSUTIYA, M.T. (2001, apud DAVID 2002) Alternativas de disposição final de biossólidos. In: **Biossólidos na agricultura**. Capítulo 5. Sabesp, Escola Politécnica – USP, ESALQ – USP/Nupegel, UNESP – Jaboticabal. São Paulo, 2001.

INTERNET:

Agência Nacional das Águas (ANA), disponível em: <http://www.ana.gov.br/> (23.11.2004 a 11.04.2005)

Agência Nacional do Petróleo (ANP): Portaria nº32, de 6 de março de 2001.

Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras S.A, disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br/procel/site/home/index.asp> (23.11.2004 a 26.04.2005)

Eletrobrás, disponível em: <http://www.eletrobras.com/> (11.04.2005)

Ministério das Cidades (MCidades) , disponível em: <http://www.cidades.gov.br/> (23.11.2004 a 11.04.2005)

Ministério de Minas e Energia (MME) , disponível em: <http://www.mme.gov.br/> (23.11.2004 a 11.04.2005)

Petrobrás Distribuidora S.A. (2005) , disponível em: <http://www.br.com.br/> (27.04.2005)

Plano Plurianual (PPA) , disponível em: <http://www.planobrasil.gov.br/default.asp> (15.01.2005)

CAPRILES, R. **Brasília 2003 – Bonn 2004: O futuro das energias renováveis**, Revista ECO21, Edição 84, Novembro de 2003, disponível em: <http://www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=577>

Brasília Platform on Renewable Energies, disponível em: <http://www.renewables2004.de>

Short information about renewables 2004, disponível em: <http://www.renewables2004.de>

PROINFA – BIOMASSA: Guia de habilitação de projetos de geração de energia elétrica – Centrais Termelétricas a Biomassa. Ministério de Minas e Energia, disponível em: <http://www.mme.gov.br>

Ministério de Minas e Energia. Apoio ao desenvolvimento de mercados para energia renovável: “**Levantamento de dados primários e secundários para implementação do programa nacional de capacitação**”. MME. Brasília, Fevereiro de 2003, disponível em: <http://www.energiabrasil.gov.br/Desenvolvimentoenergetico/Documents/Programa%20Nacional%20Capacitacao.pdf>

Ministério Alemão de Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU). **Renewable Energy – Current German and European Legislation and more**. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Maio de 2002, disponível em: <http://www.bmu.de>

ANEXO I

Características típicas dos principais sistemas de tratamento de esgotos, expressos em valores per capita. Fornecido pelo Prof. Marcos von Sperling em 14 de Março, 2005

ANEXO II

Eficiência energética de sistemas de tratamento de esgotos

ANEXO III

Resultado do Programa de Recuperação de Bacias Hidrográficas (PRODES) da
Agência Nacional das Águas (ANA)

ANEXO IV
Resultados do PROINFA – BIOMASSA