

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ENGENHARIA**

JOSÉ ANTONIO ROSA

**PRODUÇÃO E USO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO: BARREIRAS E OPORTUNIDADES**

São Paulo

2016

JOSÉ ANTONIO ROSA

**PRODUÇÃO E USO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO: BARREIRAS E OPORTUNIDADES**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

São Paulo

2016

JOSÉ ANTONIO ROSA

**PRODUÇÃO E USO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO: BARREIRAS E OPORTUNIDADES**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de Concentração: Biomassa e Energia

Orientadora: Prof.^a Dra. Suani Teixeira Coelho

São Paulo

2016

Catálogo-na-publicação

Rosa, José Antonio

Produção e uso energético de biogás de estação de tratamento de esgoto: barreiras e oportunidades / J. A. Rosa -- São Paulo, 2016.
153 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Biogás 2.Energia de biomassa 3.Energia - Saneamento
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à todas as pessoas, e em especial às que trabalham no setor de tratamento de esgoto sanitário, que visando o bem comum persistem em alcançar os objetivos em que acreditam e de forma ética e responsável transpõem barreiras, desenvolvem oportunidades, inovam e não desistem nunca.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo amor, carinho e estímulo para que eu siga estudando.

Aos mestres do PECE, à Prof.^a Dra Vanessa Pecora Garcilasso e ao Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira membros da banca examinadora, e em especial à minha orientadora Prof.^a Dra. Suani Teixeira Coelho, pela dedicação à nobre missão de ensinar.

Aos funcionários do PECE sempre prontos em nos atender.

Aos colegas do curso de Energias Renováveis pela amizade e ajuda.

Aos colegas e à Prof.^a Flávia do curso de tratamento de efluentes no Senac, pela atenção e informações fornecidas.

À todas as pessoas citadas ou não no trabalho, que diretamente ou indiretamente me apoiaram fornecendo informações, e em especial à equipe e participantes do projeto Probiogás.

O Senhor é o meu pastor:
não me falta coisa alguma!
Faz com que eu siga o bom caminho
pela honra do seu nome.

(Salmos: Salmo 22)

RESUMO

O biogás de estação de tratamento de esgoto sanitário – ETE com reatores ou digestores anaeróbicos é uma fonte de energia renovável que possibilita a geração distribuída ao se produzir energia elétrica, térmica ou ambas simultaneamente, e aumenta a eficiência energética ao se reduzir o custo com energia que é, em muitos casos, o segundo maior item de custo da operação de uma ETE. O aproveitamento energético do biogás de ETE tem impacto altamente positivo na sustentabilidade econômica e financeira, na melhoria do meio ambiente, na qualidade dos processos de tratamento, contribuindo de forma efetiva para a redução dos gases de efeito estufa, além de contribuir também para a diversificação da matriz energética nacional. Nos países desenvolvidos, o biogás de ETE é amplamente utilizado; já no Brasil o aproveitamento é incipiente, sendo que na maioria das ETEs brasileiras o biogás é simplesmente queimado. Neste contexto, esta monografia tem como objetivo identificar quais são as barreiras e quais são as oportunidades para o aproveitamento do biogás, procurando responder à pergunta: por que no Brasil há poucas ETEs que fazem o uso energético do biogás? As barreiras e oportunidades foram identificadas através de literatura, entrevista com agentes do setor e participação em seminários sobre aproveitamento de biogás de ETE. A conclusão é que há barreiras econômicas e tecnológicas, mas que em ETEs de médio e grande porte (tratando esgoto de cerca de 100.000 habitantes ou mais) as barreiras não são impeditivas para a geração de energia elétrica e térmica, tanto que há empresas no Brasil que já investiram e estão fazendo o uso energético do biogás. Já para ETEs menores, o uso térmico do biogás é sempre possível e desejável, devendo ser estudado caso a caso o uso adequado. O que de fato impede o aproveitamento do biogás no Brasil onde o projeto é viável técnica e economicamente, é um conservadorismo do setor de saneamento em fazer inovação e buscar a eficiência energética, aliado à burocracia da maioria das empresas públicas de saneamento.

Palavras-chave: Biogás de ETE: barreiras e oportunidades. Aproveitamento energético de biogás de ETE. Estação de tratamento de esgoto e produtividade energética. Saneamento e sustentabilidade.

ABSTRACT

Biogas from a wastewater treatment plant (WWTP) with anaerobics reactors or anarobics digesters is a renewable energy source that enables distributed generation by producing electric, thermal or both energy simultaneously, and that increases energy efficiency by reducing energy cost, which is, in many cases, the second largest operation cost item of an WWTP. The energy utilization of the biogas of WWTP has a highly positive impact on economic and financial sustainability, the improvement of the environment, the quality of the treatment processes and contributes effectively to the reduction of greenhouse gases, as well to diversification of the national energy matrix. In developed countries, WWTP biogas is widely used, but in Brazil the use is incipient, making that the biogas is just burned in the majority of the Brazilians WWTPs. In this context, this work aims to identify the barriers and the opportunities for the use of biogas in WWTP, trying to answer the question: why are there few WWTPs in Brazi that use biogas as a renewable energy source? Barriers and opportunities were identified through literature, interviews with industry stakeholders and participation in seminars on the use of WWTP biogas. The conclusion is that there are economic and technological barriers, but that in medium and large WWTPs (treating wastewater of about 100,000 inhabitants or more) the barriers are not impeding the generation of electric and thermal energy, so much so that there are companies in Brazil that have already invested in and are exploring the energetic use of biogas. For smaller WWTPs, the thermal use of biogas is always possible and desirable, and its appropriate use must be studied on a case-by-case basis. What effectively prevents the use of biogas in Brazil, where the project is technically and economically viable, is a conservatism of the sanitation sector in innovating and seeking energy efficiency, together with the bureaucracy of most public sanitation companies.

Keywords: WWTP biogas: barriers and opportunities. Energy utilization of biogas from WWTP. Wastewater treatment plant and energy productivity. Sanitation and sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Saneamento - Água, Esgoto, Resíduos sólidos, Drenagem	25
Figura 2.2	Ciclos do uso da água	33
Figura 2.3	ETE Sustentável como uma indústria	35
Figura 2.4	ETE Sustentável – Linhas de pesquisa de Biogás e Lodo (EPBL) – 5 MW	37
Figura 3.1	Rotas de conversão de matéria orgânica: Reator anaeróbico; Reator aeróbico	41
Figura 3.2	Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbica	44
Figura 3.3	Necessidade de tratamento conforme uso final	48
Figura 4.1	Representação esquemática de um reator UASB	52
Figura 4.2	Métodos para estimativa do potencial de produção de biogás reportados na literatura	54
Figura 4.3	Esquema geral de medição nas 5 ETEs	56
Figura 4.4	Melhorias recomendadas para reatores UASB	59
Figura 4.5	Fotos de digestores de lodo	61
Figura 4.6	Captação do biogás no topo do digestor	62
Figura 4.7	Balanco de massa e energia em digestor anaeróbico	64
Figura 5.1	Capa revista RAE nº 1 de 1936, com artigo do Engº J. P. Jesus Netto sobre aproveitamento do gás de esgoto	65
Figura 5.2	10.1 - Modalidades de uso do gás de esgoto	66
Figura 5.3	12 - Estudo Econômico	67
Figura 5.4	Microturbina do projeto Energ-Biog – 2006	68
Figura 5.5	Queima do Biogás em “Flare”	70
Figura 5.6	Formas principais de aproveitamento energético do biogás	71
Figura 5.7	Geração de energia elétrica com armazenamento de biogás ..	72
Figura 5.8	Geração térmica, com tratamento simplificado	73
Figura 5.9	Central de Cogeração da ETE Arrudas - MG Biogás de Digestor de Lodo	74
Figura 5.10	ETE Franca e uso veicular do biogás	76
Figura 5.11	ETEs com aproveitamento de biogás no Brasil	81
Figura 5.12	ETE Ouro Verde / PR – 20 KW	82
Figura 5.13	ETE Ribeirão Preto/ SP- 1,5 MW	82
Figura 5.14	ETE Jacuípe II – Feira Santana – BA – 200 KW	83
Figura 5.15	ETE Arrudas/MG – Potência 2,4 MW	83
Figura 5.16	ETEs no Brasil x tipo de tratamento	87

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1	Plansab: Investimento 2014 – 2033 - R\$ 508.453 Milhões	29
Gráfico 3.1	Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento das archaeas metanogênicas	43
Gráfico 5.1	Quantidade de Plantas de biogás – Países membros do IEA Bioenergy Task 37	77
Gráfico 5.2	Produção anual de biogás nos países membros do IEA Bioenergy Task37	78
Gráfico 5.3	Quantidade de ETEs nos EUA com potencial econômico para planta de biogás	79
Gráfico 5.4	Quantidade de ETE e respectivo tipo de tratamento	84
Gráfico 5.5	Produção estimada de biogás nas ETEs com reatores UASB	85
Gráfico 5.6	Geração de energia térmica nas ETEs utilizando reatores UASB	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Atendimento e <i>deficit</i> por componente do saneamento básico no Brasil, 2010	27
Tabela 2.2	Caracterização do atendimento e do <i>deficit</i> de acesso ao abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos	27
Tabela 2.3	Metas para tratamento de esgoto coletado nas macrorregiões e no País (em %)	28
Tabela 2.4	Poluentes presentes no esgoto bruto - efeitos/consequências	34
Tabela 3.1	Principais características do biogás em reatores anaeróbicos tratando esgoto sanitário e digestores de lodo	45
Tabela 3.2	Características de diferentes tipos de gases	46
Tabela 3.3	Poder calorífico inferior do biogás e de outros combustíveis e equivalência com o metano	46
Tabela 3.4	Níveis de tratamento requerido para diferentes tipos de uso do biogás	49
Tabela 4.1	Reatores UASB – Vantagens e desvantagens	53
Tabela 4.2	Comparação dos dados medidos em campo e os dados calculados pelos métodos reportados na literatura	55
Tabela 4.3	Principais características da ETES monitoradas	57
Tabela 4.4	Relação unitária e classificação das ETES monitoradas	57
Tabela 4.5	Estimativa de geração de energia elétrica e da potência do motorizador para as ETES monitoradas	58
Tabela 4.6	Indicadores de produção de energia em digestores de lodo primário e secundário a partir da DQO aplicada	64
Tabela 5.1	Parâmetros – Motores de combustão interna – MCI, Turbinas e Microturbinas	72
Tabela 5.2	Uso de biogás em Caldeiras e Secadores - Vantagens e Desvantagens	73
Tabela 5.3	Uso de biogás em MCI, Turbinas e Microturbinas - Vantagens e Desvantagens	75
Tabela 5.4	Quantidade de plantas de biogás na Alemanha em 2015	78
Tabela 5.5	Quantidade de plantas e potência por tipo de tecnologia CHP	80
Tabela 5.6	Quantidade de plantas de biogás no Brasil em 2015	81
Tabela 6.1	Principais grupos de barreiras para o uso do biogás de ETES nos EUA	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABIOGÁS	Associação Brasileira de Biogás e Biometano
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CHP	Combined Heat and Power
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DWA	Associação Alemã de Gestão Hídrica, Efluentes e Resíduos
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuárias
ETE	Estação de tratamento de Esgoto
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GIZ	Agência Alemã de Cooperação Internacional
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCI	Motor de Combustão Interna
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNBB	Programa Nacional de Biogás e Biometano
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROBIOGÁS	Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
RAFA	Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente
RALF	Reator Anaeróbico de Leito Fluidizado
UASB	Upward-flow Anaerobic Sludge Blanket
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNFCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação para a escolha do tema	15
1.2 O objetivo do trabalho	15
1.3 Revisão bibliográfica	16
1.3.1 Saneamento	17
1.3.2 Tratamento de Esgoto Sanitário	18
1.3.3 Biogás: Origem, Produção e Aproveitamento	18
1.3.4 Estudos técnicos-econômicos para o aproveitamento do biogás	21
1.3.5 Barreiras e oportunidades para o aproveitamento do biogás	22
 2. SANEAMENTO, ESGOTAMENTO SANITÁRIO, ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO – ETE	 25
2.1 Saneamento	25
2.1.1 Saneamento no Brasil	25
2.1.2 Atendimento e <i>deficit</i> do saneamento	26
2.1.3 Metas do Plansab para o esgotamento sanitário	28
2.1.4 Barreiras para o aumento da eficiência e universalização dos serviços de saneamento	29
2.2. Esgotamento Sanitário	31
2.2.1. Definição	31
2.2.2. Barreiras - Sistema de esgoto.....	33
2.3. Estação de Tratamento de Esgoto – ETE	34
2.3.1 Objetivos do tratamento de esgoto – A ETE sustentável	34
2.3.2 Processos básicos de tratamento de esgoto	38
2.3.2.1 Objetivos do Tratamento do esgoto	38
2.3.2.2 Processos de tratamento do esgoto	39
2.3.3 Gerenciamento do lodo como oportunidade para o biogás	40
 3. BIOGÁS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO – ETE	 41
3.1 Processos biológicos anaeróbicos como origem do Biogás de ETES	41
3.2 Digestão anaeróbica: rotas metabólicas e fatores que Influenciam a digestão anaeróbica	42
3.3 Características do biogás de ETE	45
3.4 Tratamento do Biogás de ETE.....	47

4. PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ETE: REATOR UASB E DIGESTOR DE LODO	51
4.1 Introdução	51
4.2 Reatores UASB	52
4.2.1 Reatores UASB – Princípio operacional	52
4.2.2 Reatores UASB - Vantagens e desvantagens	53
4.2.3 Estimativa de produção de biogás em reatores UASB e melhorias	54
4.2.4 Medição e comparação de potencial de produção de biogás	56
4.2.5 Melhorias recomendadas nos reatores UASB	59
4.3 Digestores anaeróbicos de lodo	60
4.3.1 Descrição geral	60
4.3.2 Produção de biogás em digestor anaeróbico de lodo	63
5. UTILIZAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS	65
5.1 História	65
5.1.1 Projetos pioneiros.....	65
5.1.2 Barreiras e Riscos.....	69
5.2 Alternativas para a utilização do biogás	70
5.2.1 Formas Principais de aproveitamento do biogás	70
5.2.2 Aproveitamento de energia, térmica e uso veicular	71
5.2.2.1 Geração de energia elétrica	71
5.2.2.2 Geração de energia térmica	73
5.2.2.3 Geração de energia elétrica e térmica (Cogeração)	74
5.2.2.4 Uso veicular	76
5.3 Aproveitamento do biogás: Europa e Estados Unidos	77
5.4 Aproveitamento do biogás de ETE no Brasil	80
5.4.1 Plantas em operação: aproveitamento atual ou fase de Implantação	80
5.4.2 Plantas em operação: Potencial de aproveitamento de biogás	84
5.4.3 Plantas a construir: Potencial de aproveitamento de biogás	87
5.5 Avaliação econômica do aproveitamento do biogás de ETE no Brasil	..88

6. BARREIRAS E OPORTUNIDADES PARA O USO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE ETE	91
6.1 Entrevistas	91
6.2 Barreiras	92
6.2.1 Cadeia produtiva para produção e uso do biogás ainda é incipiente no Brasil	92
6.2.2 Produção de biogás em reatores UASB com tecnologia ainda em desenvolvimento	93
6.2.3 Inexistência de políticas específicas para o biogás	93
6.2.4 Falta de viabilidade econômica do projeto	94
6.2.5 Aversão a inovação e a mudanças no setor de saneamento..	95
6.2.6 Deficiência na gestão das empresas de saneamento	97
6.2.7 Barreiras identificadas na pesquisa Probiogás.....	98
6.3 Oportunidades	99
6.3.1 Incentivos para o uso de energia renovável e geração distribuída	99
6.3.2 Desenvolvimento da cadeia produtiva do biogás	99
6.3.3 Reatores UASB & Pesquisa e Desenvolvimento	100
6.3.4 Plansab e Financiamento para plantas de Biogás.....	101
6.3.5 Custo crescente da energia elétrica e busca de eficiência energética	101
6.3.6 Regulação ambiental crescente: Lei 12.305 – PNRS	102
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE	
Apêndice A – Esgotamento sanitário	115
Apêndice B – Processos de tratamento de esgoto sanitário	121
Apêndice C – Gerenciamento de lodo	131
Apêndice D – ETE Sustentável – Gerenciamento de subprodutos	135
ANEXOS	
Anexo A - Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil	137
Anexo B - Principais características físicas e químicas do esgoto sanitário e suas contribuições per capita	143
Anexo C – Artigo – O gaz dos esgotos – 1936	145
Anexo D - Balanço de DQO no reator UASB e taxa de produção biogás – Método Lobato (2011)	149

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação para a escolha do tema

O aproveitamento energético do biogás, pode proporcionar à empresa de saneamento um custo operacional menor da estação de tratamento de esgoto - ETE, ao se reduzir o custo com energia comprada, salientando-se que este custo é expressivo e em geral é o segundo custo operacional atrás apenas do custo com pessoal.

A redução do custo com energia para a sociedade, pode contribuir para a universalização do saneamento no Brasil ao viabilizar a construção de novas ETEs, a atualização das ETEs existentes e também a expansão da rede de esgotamento sanitário. Outro ponto importante é que a produção e uso energético de biogás pode contribuir para a melhoria da operação da ETE no atendimento dos requisitos ambientais, quer quanto à disposição final dos efluentes no corpo receptor, quer quanto aos gases de efeito estufa emitidos na atmosfera. A universalização do saneamento significa também melhorar os índices de desenvolvimento humano, a qualidade de vida, a produtividade no trabalho e a valorização ambiental, levando a criação de condições para o desenvolvimento sustentável.

Apesar das vantagens acima apresentadas, o fato é que no Brasil o aproveitamento energético do biogás de ETE é incipiente, sendo que o biogás é simplesmente queimado, enquanto que, por exemplo, na Europa há cerca de 2470 ETEs fazendo o uso energético do biogás, conforme Svenson et al. (2016).

Tal situação leva à seguinte pergunta: por que no Brasil há poucas ETEs com produção e uso energético do biogás? O que leva à pergunta: quais as barreiras e oportunidades para a produção e uso energético do biogás de ETE?

A motivação para o tema é que ao identificar-se as barreiras e as oportunidades, abrem-se caminhos para que as empresas de saneamento, a sociedade organizada e outras entidades atuem para que sejam desenvolvidas e implementadas propostas de soluções que fomentem o uso energético do biogás, possibilitando assim que a sociedade possa se beneficiar das vantagens oferecidas por esta fonte de energia renovável, distribuída e limpa.

1.2 Objetivo do Trabalho

O trabalho tem por objetivo identificar na literatura e através de entrevistas abertas com agentes do setor quais são as barreiras e quais são as oportunidades para a produção e uso energético de biogás de ETE no Brasil. O trabalho não tem como objetivo propor soluções para transpor as barreiras ou desenvolver as oportunidades identificadas, porém o trabalho apresenta em diversos itens e no Anexo A as barreiras e respectivas propostas de ações para superá-las conforme indicada na literatura.

Os seguintes assuntos associados ao tema serão tratados e apresentados na monografia: saneamento, esgoto, tratamento de esgoto, biogás, produção de biogás, uso do biogás, cadeia produtiva do biogás, estudos técnicos e econômicos para produção e uso biogás de ETE, barreiras e oportunidades e conclusão do tema.

1.3 Revisão Bibliográfica

A seguir tem-se a revisão bibliográfica das principais referências consultadas como base para a elaboração desta monografia, considerando resumidamente os seguintes temas:

- Saneamento
- Tratamento de Esgoto Sanitário
- Biogás: Origem, Composição, Produção, Aproveitamento
- Estudos técnico-econômicos para a produção de biogás em ETE.
- Barreiras e oportunidades para a produção e uso de biogás em ETE

Os temas foram selecionados para se conhecer o ambiente social, econômico, ambiental e tecnológico onde as ETEs e em particular as plantas de biogás estão inseridas, esperando assim poder responder à pergunta: por que existe poucas plantas de aproveitamento energético do biogás de ETE no Brasil? Assim, neste contexto, busca-se identificar as barreiras que inibem a implantação das plantas para o aproveitamento energético de biogás de ETEs e as oportunidades que incentivam este aproveitamento.

As referências bibliográficas relevantes foram identificadas inicialmente a partir da documentação técnica emitida no âmbito do Probiogás, que é um projeto de cooperação técnica entre os governos do Brasil, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e o Governo Alemão, por meio da “Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH” (GIZ). O Probiogás é um projeto para o fomento ao aproveitamento energético de biogás no Brasil e tem vigência entre os anos de 2013 e 2017.

Em paralelo à documentação do Probiogás, foram relevantes para a identificação de bibliografia de referência, as teses de mestrado de Valente (2015) da COPPE/UFRJ, Silva (2015) do IEE/USP, Pecora (2006), IEE/USP e a tese de doutorado de Lobato (2011), da EE/UFMG.

Outra fonte de informação particularmente importante para esta monografia foi o IV Workshop Internacional – Aproveitamento Energético do Biogás de ETE, realizado em Curitiba/PR em 28 e 29/07/2017 – Guerra (2016) onde houve a oportunidade de conversar com diversos agentes do setor sobre o tema desta monografia, bem como desenvolver contatos para posterior entrevistas. A apresentação “Estimativa de produção do biogás de ETE no Brasil” do Prof. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, foi importante para se ter o “estado da arte” sobre este tema para reatores anaeróbicos tipo UASB.

Praticamente todas as referências bibliográficas remetem às barreiras e oportunidades identificadas no item 6 desta monografia salientando, em geral, os aspectos econômicos e tecnológicos; já os aspectos políticos e sociais são mencionados de forma implícita, com exceção do documento CNI (2016) “Burocracia e Entraves ao Setor de Saneamento”, que apresenta de forma explícita os grandes desafios que impedem o desenvolvimento do setor. Outro documento fundamental para contextualizar o aspecto social, econômico, ambiental e tecnológico para o setor de saneamento é o Plansab (2014), o qual estabelece um plano de investimento que pode induzir as ETEs a implantarem plantas de biogás, já pede que a matriz tecnológica para o setor siga tendências nacionais e internacionais, considerando a sustentabilidade e eficiência energética.

1.3.1. Saneamento

Conforme Extante (2014) o Brasil em termos internacionais está muito atrasado na questão de saneamento. O trabalho mostra a importância do saneamento, notadamente a coleta e o tratamento adequado do esgoto em temas como IDH – Índice de Desenvolvimento Humano, qualidade de vida, produtividade no trabalho e valorização ambiental, salientando os benefícios econômicos que a população brasileira teria com a universalização do saneamento.

Os resultados do estudo apontam para números alarmantes; por exemplo, no Brasil em 2013, ocorreu cerca de 340 mil internações por doenças infecciosas associadas à falta de saneamento, com mais de 2 mil mortes. As análises estatísticas realizadas evidenciaram que o acesso à rede geral de coleta de esgoto e à água tratada pode elevar a renda de um trabalhador em mais de 14%. No caso de crianças e adolescentes, a doença causa o afastamento da escola, com efeito expressivo sobre seu desempenho escolar.

Já em Plansab (2014) é mostrado que o “atendimento adequado” do saneamento no Brasil ainda é bastante deficitário, sendo o atendimento adequado para o esgotamento sanitário somente 39,7%.

Além disso, apresenta que para o setor de tratamento de esgoto coletado há metas até 2033 bastante arrojadas, ou seja, atingir 93% de tratamento de esgoto coletado, e que os investimentos necessários para atingir as metas é cerca de R\$ 508,4 bilhões de 2014 a 2033. Infelizmente face à atual situação econômica do país, os investimentos em saneamento não estão ocorrendo no volume previsto, de forma que está sendo comprometido o atendimento às metas do Plansab.

O relatório CNI (2016) apresenta que a maioria das companhias de saneamento básico tem como característica principal uma grande ineficiência. Essas empresas, com raras exceções, são “inchadas”, acumulam enormes passivos trabalhistas e tributários, apresentam níveis baixos de cobertura dos serviços de água e esgoto, convivem com elevadas perdas físicas e comerciais e sua capacidade de endividamento está esgotada.

Esta monografia apresenta que há uma grande oportunidade para o aproveitamento do biogás face aos investimentos previstos para se ter a universalização do saneamento, que demandará novas ETEs as quais poderão ser construídas já considerando o aproveitamento do biogás. Por outro lado, é apresentado também na monografia, que face a escassez de recursos para investimentos e a situação financeira das empresas públicas de saneamento, a barreira que se apresenta para o aproveitamento do biogás é que há outras prioridades de investimento, tais como estender a rede de coleta de esgoto, deixando o investimento do biogás para o futuro.

1.3.2 Tratamento de Esgoto Sanitário

O termo esgoto, segundo Jordão (2014) está sendo substituído pelo termo “águas residuárias”, a exemplo do que ocorre em inglês onde o termo “sewage” está sendo substituído pelo termo “wastewater”; acredita-se que futuramente o termo “águas residuárias” será adotado majoritariamente, pois contribui para uma mudança cultural geral que levará a que o esgoto seja tratado para o aproveitamento de recursos, incluindo a água de reuso, o que já vem acontecendo em algumas ETEs no Brasil e em diversas ETEs no exterior.

Os processos de tratamento de esgoto que ocorrem nos reatores utilizados nas ETEs, também designados digestores, podem ser anaeróbicos (geram metano) ou aeróbicos (não geram metano). Há inúmeras tecnologias de tratamento de esgoto em uso no Brasil sendo que em Von Sperling (2014) são apresentadas as principais que podem ser classificadas: Lagoas, Lodo ativado e UASB. Nesta monografia é tratado somente as tecnologias com reatores anaeróbicos: lodo ativado convencional e UASB, por gerar e possibilitar técnica e economicamente, em muitos casos, o aproveitamento do biogás.

O foco principal do tratamento do esgoto no século XX foi a remoção de sólidos sedimentáveis e flotáveis, matéria orgânica expressa como demanda bioquímica de oxigênio (DBO) ou demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST) e organismos patogênicos; agora no século XXI os esgotos não são mais vistos, pelo menos nos países mais comprometidos com a qualidade de vida de sua população e com a sustentabilidade, como um subproduto da atividade humana que deve ser disposto, mas como uma fonte de renovável de energia, como um recurso e, até mesmo, como água potável. Metcalf & Eddy (2014); Jordão (2014); Rossetti (2016).

Neste contexto, a produção e uso energético do biogás contribui para que a ETE seja vista como uma unidade produtiva, que atende ao conceito da “nova estação de tratamento”, com sustentabilidade econômica e financeira assegurada e, sob os aspectos técnicos que atende a requisitos que garantam a qualidade adequada, a exemplo do que ocorre em diversos países em estágios mais avançados no que se refere à saneamento.

Infelizmente na maioria das ETEs brasileiras o potencial energético do biogás é desperdiçado; por exemplo, em Chernicharo (2016) tem-se que em 1439 ETEs inventariadas no Brasil, 639 tinham reatores UASB (cerca de 45%), identificando um grande potencial de produção de biogás (cerca de 246.000 Nm³/d), com aproveitamento em energia. Este biogás hoje é queimado, ou perdido diluídos nos efluentes ou lançado na atmosfera através de vazamentos. Já em Rosenfeldt et al. (2016), foi identificado 51 ETEs com reatores UASB e 49 com Lodos Ativados, totalizando 90 ETEs que apresentam potencial de aproveitamento energético do biogás com viabilidade econômica, e que podem se beneficiar de financiamento governamental para a planta de biogás por ter vazão superior a 250 l/s (População acima de 150.000 habitantes).

1.3.3 Biogás: Origem, Composição, Produção, Aproveitamento

a) Origem e potencial

É possível obter biogás com alta taxa de metano por processos biológicos anaeróbicos, a partir de inúmeros resíduos orgânicos, provenientes das explorações agrícola e pecuárias, matadouros, destilarias, fábricas de laticínios, esgotos domésticos e estações de tratamento de resíduos sólidos urbanos, os quais

apresentam uma carga poluente elevada que pode levar a danos ambientais, sociais e econômicos. Segundo ABiogás (2015), estima-se o potencial de produção de biogás de maneira conservadora no Brasil em 23 Bilhões de m³/ano, sendo 12 bilhões de cana-de açúcar, 8 bilhões de alimentos e 3 bilhões de resíduos. Esse montante equivale a aproximadamente 12 bilhões de litros equivalente de diesel.

Observa-se que há um enorme potencial para a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos, mas esta indústria ainda é incipiente no Brasil. A produção de biogás oriundo do tratamento de esgoto sanitário é uma parcela muito pequena deste potencial e certamente vai beneficiar-se do crescimento desta indústria, pois o aproveitamento do biogás ganharia escala, incentivaria a produção de equipamentos no Brasil reduzindo custos com importação, e ajudaria a reduzir a barreira tecnológica e econômica para o uso energético do biogás.

b) Composição

Conforme Silveira et al. (2015) o biogás proveniente de tratamento anaeróbio de esgoto sanitário é uma mistura gasosa composta principalmente de metano (CH₄: 60-85%) e gás carbônico (CO₂: 5-15%) e em bem menor escala, de gás sulfídrico (H₂S), nitrogênio (N₂), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e outros gases traço, derivada da atividade biológica durante a decomposição anaeróbica de matéria orgânica. Já a composição típica do biogás de digestor de lodo tem outra concentração de gases, tais como CH₄ variando em volume de 60-70%, CO₂ de 20-40% e outros compostos não normalmente encontrados em biogás de esgoto sanitário.

O metano produzido no processo de digestão anaeróbica pode causar grande impacto ambiental se for liberado diretamente na atmosfera. Por isso, há a necessidade de sua queima ou aproveitamento energético, convertendo o CH₄ para CO₂ diminuindo, assim, o impacto causado ao meio ambiente.

c) Produção - Medição

Uma das barreiras tecnológicas para o aproveitamento energético do biogás de ETE com reatores UASB é o desconhecimento da quantidade de biogás que é efetivamente produzida ao longo do tempo e disponibilizada para aproveitamento energético; outra barreira é não se ter um domínio completo da tecnologia UASB para se fazer o cálculo da produção do biogás para aproveitamento energético e então dimensionar e projetar a planta de biogás para uma ETE nova. A boa notícia é que importantes avanços foram conseguidos em relação ao entendimento do comportamento da produção de biogás e das possibilidades do seu aproveitamento energético. Silva (2015); Cabral (2016); Lobato (2011); Chernicharo (2016); Possetti (2015).

Tem-se em Silva (2015) que foi realizado a medição em tempo real das taxas de produção de biogás e metano em uma ETE de grande porte e comparado com os métodos reportados na literatura. A ETE selecionada foi a ETE Atuva Sul, em Curitiba – PR, com capacidade nominal de tratamento de esgoto 1.120 L/s, coletando e tratando o esgoto de cerca de 420.000 pessoas. Os métodos de cálculo considerados foram: IPCC; UNFCCC, CHERNICHARO, CETESB, LOBATO. Ao comparar os dados medidos com os dados calculados, foi verificado que os métodos de cálculo acima efetivamente superestimam a produção de biogás e metano, podendo chegar em até 10 vezes mais que os dados reais. O método de LOBATO, apresentado em Lobato (2011) é o que se apresentou mais próximo dos valores

medidos, e é sugerido como o indicado quando não puder ser realizado medida em campo.

Além disso, considerando o método de LOBATO, foi concluído em Silva (2015) que: a ETE não está produzindo a totalidade de seu potencial de produção de biogás e metano, e pode estar com problemas em sua operação ou estruturais, que aumentam as perdas e diminuem a disponibilidade de biogás; pode estar havendo perdas de biogás através de fissuras, tampões mal selados, etc. o que leva à emissão de gases de efeito estufa (metano) e de gases odorantes (sulfetos); com planejamento adequado é possível haver interação entre saneamento ambiental de qualidade e geração de energia de forma sustentável, isso em função de que qualidade das instalações da estação e a eficiência do tratamento estão diretamente relacionados à quantidade de energia produzida e, portanto, pode ser uma relação que agrega benefícios para ambos os setores.

Outro esforço importante para aumentar o conhecimento sobre a produção de biogás em ETE com reatores UASB foi, conforme indicado em Cabral (2016), a pesquisa iniciada em dez ETEs no âmbito do Projeto Probiogás com os objetivos de: a) analisar em tempo real a vazão e a composição do biogás; b) estabelecer as relações unitárias de produção específica de biogás para cada ETE, correlacionando-as com as condições operacionais e ambientais e c) estimar o potencial de geração de energia.

A pesquisa, reportada em Cabral (2016) com dados somente de 5 ETEs incluiu a realização de medições on-line em um período de 12 meses, possibilitando assim fazer uma análise consistente dos resultados e apresentar recomendações para a melhoria da operação das ETEs, notadamente quanto á evitar perdas de biogás para a atmosfera; em resumo, recomenda-se que para os reatores UASB existentes se faz necessário reformas para evitar perdas de biogás; já para novos reatores, os projetos dos mesmos devem considerar mudanças nos aspectos construtivos e operacionais para minimizar perdas de biogás, possibilitando a viabilidade econômica para o aproveitamento energético do biogás e reduzindo danos ambientais.

d) Aproveitamento

O documento de Silveira et al. (2015) - Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / PROBIOGÁS, é uma referência primordial para esta monografia, pois foi elaborado por um grupo de trabalho multidisciplinar voltada para o esgotamento sanitário, com representantes de diversas empresas de saneamento (Sanasa, Sanepar, Caesb, Sabesp, Semaes, Copasa, Sabesp), universidade - UFMG; fornecedor de projeto e equipamento - Rotária do Brasil, Ministério das Cidades, GIZ,) com notória experiência em ETEs.

O guia apresenta oportunidades, desafios e perspectivas sobre o uso de biogás no Brasil e comenta que no setor de saneamento existe a crença de que: o uso energético do biogás é uma solução ainda para o futuro e que muitas prestadoras de serviços alegam que a principal razão para não haver mais projetos é a falta de viabilidade financeira.

Neste contexto o guia é uma excelente referência para a divulgação técnica da produção e uso do biogás, bem como para sensibilizar os envolvidos que é uma solução viável técnica e econômica, contribuindo assim para ajudar a mudar a cultura da comunidade do setor de saneamento brasileira para a efetiva aplicação desta tecnologia agora e não no futuro.

1.3.4 Estudos técnicos-econômicos para o aproveitamento do biogás

O trabalho de Rosenfeldt (2016) tem como objetivo analisar, do ponto de vista técnico-econômico, a viabilidade do uso de biogás gerado em estações de tratamento de esgotos (ETEs), para fins de produção de energia elétrica. O estudo compara três tecnologias de tratamento de esgoto, sendo que duas delas são capazes de gerar biogás: O reator UASB e o digestor anaeróbico de lodo. Foram comparadas as configurações apresentadas a seguir, considerando uma contribuição de esgotos provenientes de uma população de 100.000 habitantes:

- Lodos ativados de aeração prolongada (arranjo sem etapa anaeróbica);
- Lodos ativados convencional, seguido de tratamento anaeróbico de lodo (digestor), com e sem aproveitamento energético do biogás gerado;
- Reator UASB, seguido de lodos ativados convencional, com e sem aproveitamento energético do biogás gerado.

A conclusão do estudo foi que todas as configurações acima estudadas com tratamento anaeróbico são viáveis economicamente, sendo que a configuração que se mostrou mais vantajosa foi o sistema de UASB combinado com lodo ativado convencional e com uso do biogás para a produção de energia elétrica.

Outro trabalho de referência é Valente (2015), que avaliou a viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás em ETEs que atendem entre 50.000 e 450.000 habitantes, com a tecnologia de tratamento biológico UASB seguido de pós-tratamento com lodos ativados, considerando cinco diferentes arranjos:

- 1-Geração com eletricidade contínua,
- 2-Geração no horário de ponta,
- 3-Cogeração com secagem parcial do lodo,
- 4-Secagem do lodo com geração de eletricidade para auto suprimento do secador e
- 5-Somente secagem do lodo,

Valente (2015) concluiu que a escala mínima de viabilidade, com TIR acima de 8% a.a., para os diferentes arranjos, encontra-se entre 100.000 e 200.000 habitantes. Este cenário, segundo Valente (2015) indica que em mais de 172 municípios brasileiros essa alternativa poderia ser economicamente viável, e para cenários menos conservadores, em até 300 municípios, ou cerca de 57% da população brasileira.

Além disso, o trabalho apresenta uma análise dos riscos e oportunidades para o aproveitamento energético do biogás considerando as principais variáveis que influenciam a viabilidade econômica do aproveitamento; apresenta também propostas de melhorias tecnológicas e novos arranjos e propostas de medidas para incentivar o aproveitamento energético de biogás em ETEs. Os riscos e oportunidades apresentados em Valente (2015) estão inclusos nesta monografia no item 6- Barreiras e Oportunidades para o uso energético do biogás de ETE.

1.3.5 Barreiras e oportunidades para o aproveitamento do biogás

Há pelo menos quarenta anos são empreendidas iniciativas para desenvolver o uso energético do biogás nacionalmente, seja em ambientes urbanos ou rurais. Há diversas hipóteses, segundo ABiogás (2015), que tentam explicar o motivo pelo qual essa fonte energética ainda não conseguiu ser aproveitada adequadamente, apesar do grande potencial, mas até o momento não houve uma sistematização sobre as razões que contribuem para que o uso do biogás não seja difundido.

O trabalho de Oliver et al. (2016), realizado entre janeiro de 2014 e maio de 2015, apresenta o resultado de entrevistas realizadas com 38 empresas e instituições do setor de biogás (não exclusivamente de ETEs) atuantes no país e que implantaram ou planejam implantar empreendimentos para a produção e uso energético de biogás, objetivando identificar as barreiras, impactos e propostas para ações para superar as barreiras identificadas.

O resumo do trabalho (Anexo A) apresenta as 27 barreiras identificadas para o setor de biogás no Brasil, com os impactos e ações para a remoção de cada barreira, e as classifica em quatro categorias:

- A. Relação incerta entre o custo do projeto e seu benefício comercial
- B. Reduzida quantidade de projetos de referência bem-sucedidos em escala comercial
- C. Dificuldade no acesso a informações técnicas, comerciais e legais
- D. Inexistência de políticas relacionadas ao biogás.

Similarmente a pesquisa acima, tem-se em Willis, J. et al. (2012) um relatório que apresenta a pesquisa realizada nos EUA com mais de 200 participantes de ETEs para:

- Identificar as barreiras que as ETEs públicas encontram para implementar o uso energético do biogás;
- Providenciar estratégias específicas para superar as barreiras, e
- Providenciar recomendações para expandir a produção de energia renovável oriunda do biogás.

As barreiras identificadas nos EUA são praticamente as mesmas identificadas no Brasil; as propostas para superar as barreiras são referências para definir estratégias no Brasil ao desenvolver oportunidades e superar barreiras.

Tem-se também em Silveira et al. (2015) a identificação de diversas barreiras e oportunidades, como comentários sobre transpor as barreiras considerando os itens: Contextualização, Viabilidade do uso de biogás no Brasil, Tarifa de energia elétrica, Condicionamento, transporte e disposição final do lodo, Qualidade dos projetos e das obras, Qualidade dos equipamentos, Qualidade de operação. Tais barreiras, oportunidades e propostas de solução contribuem para se ter a uma visão geral dos motivos para a reduzida utilização do biogás no Brasil.

Outro estudo interessante é Rosenfeldt et. al. (2016), que apresenta diversas barreiras e oportunidades, considerando o impacto na viabilidade econômica dos projetos. O trabalho mostra a fragilidade com relação à dependência atual de importação dos equipamentos dependente da variação cambial desfavorável; os aspectos construtivos e de operação das ETEs na produção do biogás que podem provocar perda de biogás que inviabilize o empreendimento. O preço da energia elétrica também é um fator importante na viabilização do empreendimento.

O trabalho foi elaborado pela equipe da Rotaria do Brasil, empresa fornecedora de equipamentos e de engenharia para projetos de aproveitamento de biogás e que também faz parte do projeto Probiogás. Esta empresa implantou o projeto de aproveitamento do biogás da ETE Jacuípe II/Bahia de 200 KW, finalizado em 2016; portanto tem vivência na prática das barreiras e oportunidades atuais existentes no Brasil.

Finalmente a maioria das referências relacionadas no capítulo “Referências Bibliográficas” apresentam direta ou indiretamente barreiras e oportunidades para o aproveitamento energético do biogás em estações de tratamento de esgotos, e foram utilizadas como compor e comentar as barreiras e oportunidades apresentadas no capítulo 6 desta monografia.

2. SANEAMENTO, ESGOTAMENTO SANITÁRIO, ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO – ETE

2.1 Saneamento

2.1.1 Saneamento no Brasil

Este item tem como objetivo apresentar o contexto do saneamento no Brasil e as principais barreiras e propostas para a gestão do setor reduzir o déficit de saneamento básico no Brasil que são alarmantes, notadamente no abastecimento de água e esgotamento sanitário; o contexto do setor de saneamento ajudará a identificar barreiras e oportunidades para a produção e uso do biogás em estações de tratamento de esgoto.

O direito à saúde é direito de todos e dever do Estado, conforme estabelecido na Constituição Federal do Brasil de 1988. Neste contexto, em janeiro de 2007 foi promulgada a Lei Nacional de Saneamento, Lei n.11.445/2007, que inaugurou um novo ciclo do saneamento no Brasil, ao estabelecer diretrizes para o saneamento e para a política federal de saneamento básico no país, cobrindo uma histórica lacuna na legislação deste setor.

Salienta-se que o saneamento é definido na Lei 11.445/2007 como o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de: abastecimento de: 1-água potável; 2-esgotamento sanitário; 3-limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos; 4-drenagem e manejo das águas pluviais urbanas.

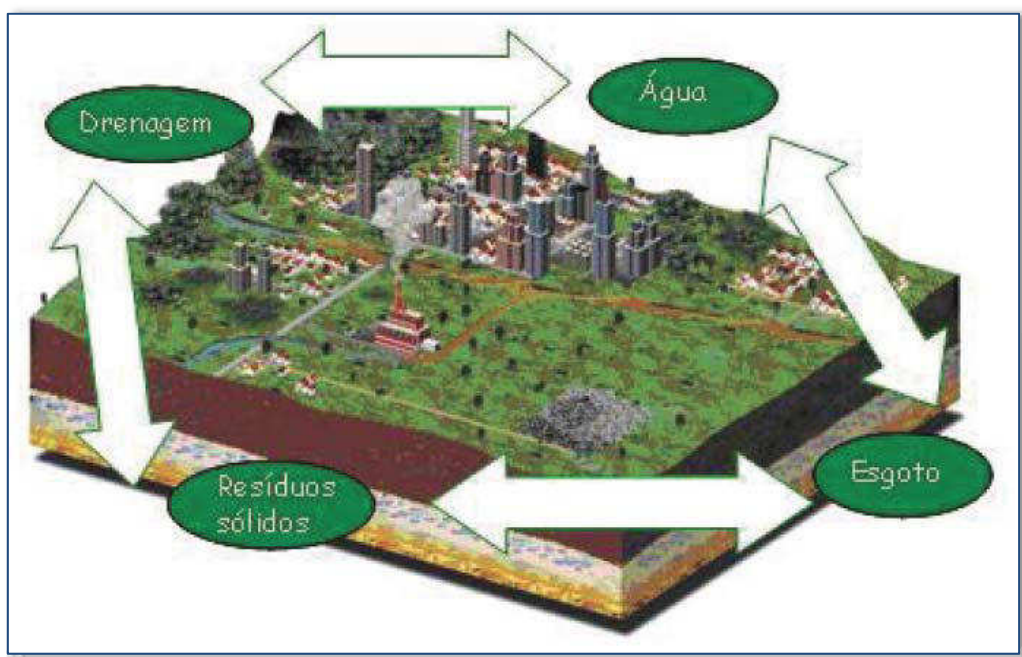


Figura 2.1 – Saneamento: Água, Esgoto, Resíduos sólidos, Drenagem.
Fonte: Chernicharo (2008)

A Lei 11.445/2007 tem treze princípios fundamentais para o saneamento, dos quais destacamos somente os princípios abaixo:

I - universalização do acesso;

VII - eficiência e sustentabilidade econômica;

VIII - utilização de tecnologias apropriadas, considerando a capacidade de pagamento dos usuários e a adoção de soluções graduais e progressivas;

Salienta-se que neste trabalho mostraremos que o aproveitamento energético do biogás, onde possível, é uma tecnologia apropriada que pode contribuir para expansão do sistema de esgotamento e para a universalização do acesso, ao se mostrar uma tecnologia eficiente e com sustentabilidade econômica em muitas situações.

2.1.2 Atendimento e *déficit* do saneamento

O Plano Nacional de Saneamento Básico - PNSB, denominado Plansab, aprovado pelo Decreto Presidencial nº 8.141, de 20 de novembro de 2013; previsto na Lei 11.445/2007, apresenta a situação do saneamento no Brasil e estabelece metas até 2033, visando atingi-las ao longo dos 20 anos de sua execução.

Os impactos esperados com o Plansab para a sociedade são: Melhoria das condições de saúde, com impactos sobretudo nos indicadores de saúde infantil, a exemplo da mortalidade infantil; proteção do meio ambiente, especialmente água e solo; contribuição para a redução da pobreza; desenvolvimento urbano, econômico e social.

Observa-se na Tabela 2.1, que o saneamento no Brasil ainda é bastante deficitário, sendo o percentual de “atendimento adequado”, conforme definido na Tabela 2.2, bastante reduzido: Abastecimento de água 59,4%; Esgotamento sanitário 39,7%; Manejo de resíduos sólidos 41,4%, o que representa que há milhões de pessoas vivendo em ambientes insalubres e expostos a diversos riscos que podem comprometer a sua saúde.

Tabela 2.1 - Atendimento e déficit por componente do saneamento básico no Brasil, 2010

Componente	Atendimento adequado		Deficit			
	(x 1.000 hab)	%	Atendimento precário		Sem atendimento	
	(x 1.000 hab)	%	(x 1.000 hab)	%	(x 1.000 hab)	%
Abastecimento de água	112.497	59,4	64.160	33,9	12.810	6,8
Esgotamento sanitário	75.369	39,7	96.241	50,7	18.180	9,6
Manejo de resíduos sólidos	111.220	58,6	51.690	27,2	26.880	14,2

Fonte: Plansab (2014)

Tabela 2.2 - Caracterização do atendimento e do *deficit* de acesso ao abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos

Componente	Atendimento Adequado	Deficit	
		Atendimento	Sem
Abastecimento de água	Fornecimento de água potável por rede de distribuição ou por poço, nascente ou cisterna, com canalização interna, em qualquer caso sem intermitências (paralisações ou interrupções).	- Dentre o conjunto com fornecimento de água por rede e poço ou nascente, a parcela de domicílios que: - Não possui canalização interna; - recebe água fora dos padrões de potabilidade; - tem intermitência prolongada ou racionamentos. - Uso de cisterna para água de chuva, que forneça água sem segurança sanitária e, ou, em quantidade insuficiente para a proteção à saúde. - Uso de reservatório abastecido por	Todas as situações não enquadradas nas definições de atendimento e que se constituem em práticas consideradas inadequadas
Esgotamento sanitário	- Coleta de esgotos, seguida de tratamento; - Uso de fossa séptica.	- Coleta de esgotos, não seguida de tratamento; - Uso de fossa rudimentar.	
Manejo de Resíduos sólidos	- Coleta direta, na área urbana, com frequência diária ou em dias alternados e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos; - Coleta direta ou indireta, na área rural, e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos.	Dentre o conjunto com coleta, a parcela de domicílios que se encontram em pelo menos uma das seguintes situações: - na área urbana, com coleta indireta ou com coleta direta, cuja frequência não seja pelo menos em dias alternados; - destinação final ambientalmente inadequada.	

Fonte: Plansab (2014)

Tem-se em Extante (2014) que “o Brasil em termos internacionais está muito atrasado na área de saneamento. Notadamente a água tratada e a coleta e tratamento de esgoto estão muito distantes do acesso universal. Isso implica prejuízos à qualidade de vida e à economia. O baixo percentual de acesso à rede geral de coleta de esgoto é particularmente mais grave e nesta situação o impacto ambiental também é excessivamente elevado, o que deprime o valor dos ativos

imobiliários e o potencial econômico de atividades que dependem de boas condições ambientais para o seu exercício pleno. Os dados comparativos internacionais mais recentes colocam o Brasil na 112ª posição num ranking dos 200 países, sendo que essa colocação é, sem sombra de dúvidas, vergonhosa para a nação que é a 7ª maior economia do mundo”.

2.1.3 Metas do Plansab para o esgotamento sanitário

O Plansab (2014) apresenta um conjunto de metas para as diversas áreas do saneamento, onde destaca-se na Tabela 2.3 para o setor de esgotamento sanitário apenas as metas para os indicadores referentes ao número de domicílios urbanos servidos por rede coletora ou fossa séptica para os excretas ou esgotos sanitários / Total de domicílios urbanos e ao índice de tratamento de esgoto coletado (Volume de esgoto coletado tratado / Volume de esgoto coletado).

Tabela 2.3 - Metas para tratamento de esgoto coletado nas macrorregiões e no País (em %)

Indicador	Ano	Brasil	N	Ne	Se	S	CO
% de domicílios urbanos servidos por rede coletora ou fossa séptica para os excretas ou esgotos sanitários	2010	75	41	57	91	78	56
	2018	82	56	66	94	84	69
	2023	85	68	73	95	88	77
	2033	93	89	86	98	96	92
% de tratamento de esgoto coletado	2008	53	62	66	46	59	90
	2018	69	75	77	63	73	92
	2023	77	81	82	72	80	93
	2033	93	94	93	90	94	96

Fonte: Plansab (2014)

Observa-se que as metas são bastante arrojadas até 2033 para os indicadores apresentados, ou seja: 93% de domicílios urbanos servidos por rede coletora ou fossa séptica para os excretas ou esgotos sanitários; 93% de tratamento de esgoto coletado.

Considera-se que as metas são bastante desafiadoras, pois as premissas consideradas no Plansab (2014) para atingir tais metas implicam na redefinição da relação público-privado para reorganizar o sistema de inovação e as cadeias produtivas; na elevação das taxas nacionais de investimento; no desenvolvimento da educação e saúde; no estabelecimento do desenvolvimento sustentável; na promoção da mudança estrutural da formação sociocultural da população entre outras considerações.

2.1.4 Barreiras para o aumento da eficiência e universalização dos serviços de saneamento

Certamente o grande desafio para se atingir as metas do Plansab é manter o nível de investimento previsto no Plansab (2014) de cerca de R\$ 508,45 bilhões de Reais de 2014 até 2033 (Gráfico 2.1).



Gráfico 2.1 - Plansab: Investimento 2014 – 2033 - R\$ 508.453 Milhões.
Fonte: Plansab (2014)

Conforme relatório da Confederação Nacional da Indústria - Burocracia e Entraves ao setor de Saneamento CNI (2016), para os setores de água e de esgoto/tratamento a média de investimento no período de 2002 a 2012 foi de R\$ 7,6 bilhões ao ano; considerando este ritmo de investimento, a universalização do saneamento somente será atingida em 2054, ou seja, com um atraso de 21 anos em relação ao planejado no Plansab (2014), o qual requer um investimento médio de cerca de 15,2 bilhões ao ano de 2013 à 2033, formando o total de R\$ 304,0 bilhões.

Segundo CNI (2016) os serviços de saneamento têm característica predominantemente local, onde os mais de 5000 municípios são, em geral, legalmente responsáveis pelo planejamento, pela organização e pela regulação desses serviços; atualmente, cerca de 90% das empresas de água e esgoto são controladas pelos municípios ou estados.

Além disso, o relatório CNI (2016) apresenta que a maioria das companhias de saneamento básico tem como característica principal uma grande ineficiência; essas empresas, com raras exceções, são “inchadas”, acumulam enormes passivos trabalhistas e tributários, apresentam níveis baixos de cobertura dos serviços de água e esgoto, convivem com elevadas perdas físicas e comerciais e sua capacidade de endividamento está esgotada.

Por essas razões, elas não conseguem financiar a expansão ou modernização da própria infraestrutura, condição necessária para a melhoria dos serviços oferecidos”.

O relatório CNI (2016) apresenta as seguintes barreiras para o aumento da eficiência e universalização dos serviços de saneamento para os setores de água e esgoto/tratamento:

- *Restrições no planejamento setorial*
- *Falta de estrutura na regulação*
- *Deficiências na gestão das companhias de saneamento*
- *Dificuldades de financiamento*
- *Baixa qualidade dos projetos de engenharia e lentidão nas obras*
- *Excesso de tributação*

São diversas as propostas do relatório CNI (2016) para transpor as barreiras acima; entretanto destaca-se nesta monografia, no item 6.2.6, as propostas para a barreira “Deficiências na gestão das companhias de saneamento”.

Considera-se que é necessário promover um choque de gestão nas companhias de saneamento com foco na operação eficiente e de qualidade na prestação de serviço do setor. O equilíbrio econômico-financeiro também deve ser considerado para que as metas estabelecidas no Plansab sejam alcançadas.

Certamente a implementação de programas de incentivos orientados para projetos eficientes e a criação de políticas e planos que permitam novas receitas para as companhias de saneamento, como o aproveitamento energético do biogás e o reuso da água, contribuirão para financiar a expansão ou modernização da própria infraestrutura do saneamento.

2.2 Esgotamento Sanitário

2.2.1 Definição

Encontra-se em Funasa (2015) que a expansão demográfica e o desenvolvimento tecnológico trazem como consequência imediata o aumento do consumo de água. Durante o ciclo de uso em diversas atividades humanas, a água vai incorporando inúmeras substâncias que alteram suas características, ainda que permaneça na sua forma líquida, passando então a ser chamada de águas servidas ou esgoto. Assim, as águas servidas contêm basicamente matéria orgânica e mineral, em solução e em suspensão, bem como alta quantidade de bactérias e outros organismos patogênicos e não patogênicos.

Segundo Jordão (2014) a aversão injustificada pelo termo “esgoto” tem levado alguns autores ao emprego do termo “águas residuárias”, que expressa a tradução literal da palavra “wastewater”, amplamente usada em inglês para substituir o termo “sewage”. Esta tendência tem proliferado o uso da sigla ETAR (Estação de Tratamento de Águas Residuárias) conflitando com a sigla ETE (Estação de Tratamento de Esgoto), tradicional e recomendada pela ABNT.

De acordo com Nuvolari (2011) o esgoto sanitário, segundo definição da norma brasileira NBR 9648 ABNT (1986), é o “despejo líquido constituído de esgoto doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária”. Essa mesma norma define ainda:

- Esgoto doméstico é o “despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas”;
- Esgoto industrial é o “despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitados os padrões de lançamento estabelecidos”;
- Água de infiltração é “toda água proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações”;
- Contribuição pluvial parasitária é “a parcela do deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede de esgoto sanitário”.

Estas definições já estabelecem a origem do esgoto sanitário que, dadas tais parcelas, pode ser designado simplesmente como *esgotos*.

Encontra-se em Nuvolari (2011) que apesar das definições acima serem inequívocas, algumas considerações podem ser feitas.

A água de infiltração, contribuições indevidas provenientes do subsolo, são genericamente designadas como infiltrações e incluem:

- a) Águas que penetram nas tubulações pelas juntas;
- b) Águas que penetram nas canalizações através de imperfeições das paredes dos condutos;
- c) Águas que penetram no sistema pelas estruturas de poços de visita, estações elevatórias, etc.

A água pluvial parasitária não deveria chegar aos coletores do sistema separador absoluto, mas na realidade sempre chegam, não somente devido a defeitos das instalações, mas também devido às ações clandestinas, à falta de fiscalização e à negligência.

As águas pluviais parasitárias chegam para o sistema coletor por meio de:

- a) Ligações de canalizações pluviais prediais à rede de esgoto
- b) Interligações de galerias de águas pluviais à rede de esgoto
- c) Tampões de poços de visitas e outras aberturas;
- d) Ligações abandonadas.

O Apêndice A apresenta maiores detalhes do sistema de esgotamento sanitário, mostrando:

- Classificação de sistemas de esgoto
- Composição do esgoto e necessidade de tratamentos
- Quantificação da matéria orgânica presente no esgoto sanitário

O tratamento e a disposição final adequada dos esgotos na ETE é uma medida fundamental para o gerenciamento do ciclo do uso da água, incluindo o planejamento, projeto, execução e controle das obras necessárias para a manutenção da qualidade da água desejada em função dos seus diversos usos.

A Figura 2.2 apresenta a integração do sistema de esgoto sanitário no ciclo do uso da água, envolvendo a captação da água bruta, tratamento de água, distribuição de água tratada, coleta de esgoto sanitário, tratamento do esgoto sanitário, destinação do esgoto tratado nos corpos receptores, que direta ou indiretamente são a origem para a captação da água bruta, fechando então o ciclo da água.

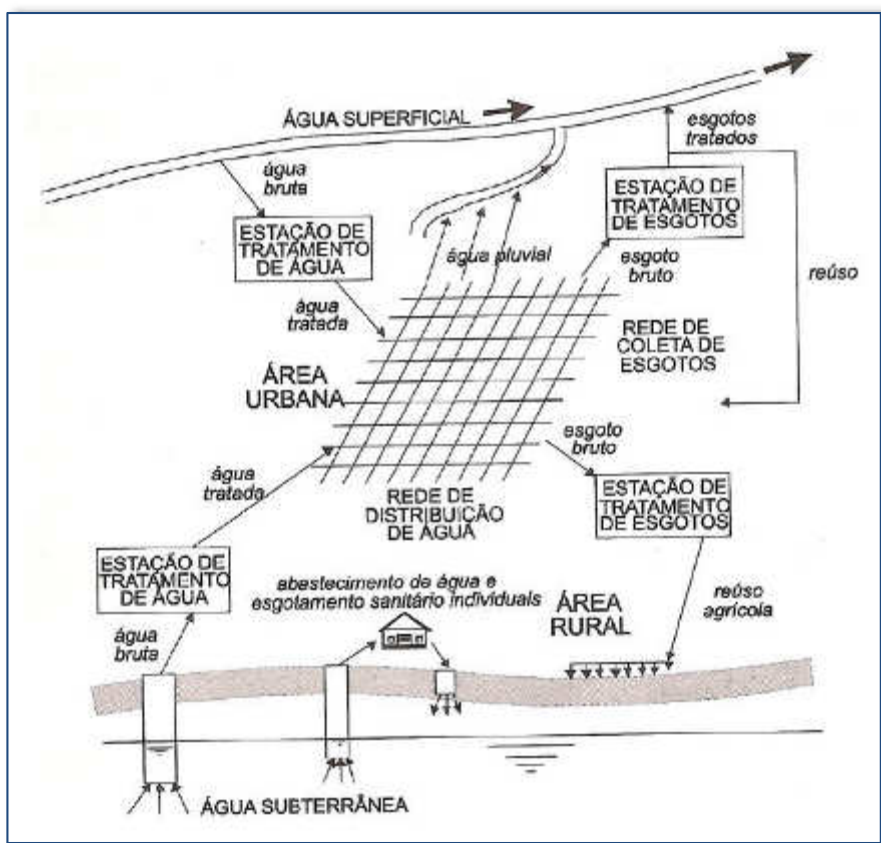


Figura 2.2. Ciclos do uso da água.

Fonte: Von Sperling (2014)

2.2.2 Barreiras – Sistema de esgoto.

O sistema de coleta de esgoto é considerado pelo setor de tratamento como uma barreira ao aproveitamento do biogás, principalmente pela influência das águas pluviais, que ao diluírem o esgoto reduzem a produção de biogás. Outro fator são esgotos industriais clandestinos, que dependendo da composição, podem comprometer o sistema de tratamento biológico, implicando na redução da produção do biogás. As empresas de saneamento precisam expandir e fazer a manutenção da rede de coleta de esgoto; esta atividade é considerada mais prioritária que o tratamento, fazendo com que investimentos em melhorias inovações no sistema de tratamento, como o biogás, sejam postergados face a escassez de recursos.

2.3 Estação de Tratamento de Esgoto

2.3.1 Objetivos do tratamento de esgoto: A ETE sustentável

Tem-se em Metcalf &, Eddy (2011), que de uma maneira geral os objetivos do tratamento do esgoto até os anos 1970 eram associados a (1) remoção de sólidos suspensos e flotáveis, (2) tratamento de orgânicos biodegradáveis (3) eliminação de organismos patogênicos. A Tabela 2.4 apresenta os principais poluentes presentes no esgoto sanitário e respectivos efeitos e consequências.

Tabela 2.4 - Poluentes presentes no esgoto bruto e efeitos/consequências

Poluentes	Parâmetros de caracterização	Tipos de efluentes	Efeitos /Consequências
Sólidos em suspensão	Sólidos em suspensão totais	Domésticos Industriais	Problemas estéticos Depósitos de lodo Adsorção de poluentes Proteção de patógenos
Sólidos flutuantes	Óleos e graxas	Domésticos Industriais	Problemas estéticos
Matéria orgânica biodegradável	Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	Domésticos Industriais	Consumo de oxigênio Mortandade de peixes Condições sépticas
Organismos patogênicos	Coliformes	Domésticos	Doenças relacionadas com as águas
Nutrientes	Nitrogênio Fósforo	Domésticos Industriais	Crescimento excessivo de algas Toxicidade aos peixes Doença em recém-nascidos (nitratos)
Compostos não biodegradáveis	Pesticidas Detergentes Outros	Industriais Agrícolas	Toxicidade Espumas Redução de transferência de oxigênio Não biodegradabilidade Maus odores
Metais pesados	Elementos específicos (ex: arsênio, cádmio, cromo, mercúrio, zinco, etc.)	Industriais	Toxicidade Inibição do tratamento biológico dos esgotos Problemas de disposição do lodo na agricultura Contaminação da água subterrânea
Sólidos inorgânicos dissolvidos	Sólidos dissolvidos totais Condutividade elétrica	Reutilizados	Salinidade excessiva - prejuízo às plantações (irrigação) Toxicidade a plantas (alguns íons) Problemas de permeabilidade do solo (sódio)

Fonte: Funasa (2015)

Conforme Metcalf & Eddy (2014), a partir de 1980 os antigos objetivos se mantiveram, mas os níveis de tratamento requeridos aumentaram consideravelmente e novos objetivos foram adicionados, de forma que os projetos de sistemas de tratamento de esgoto devem se submeter a legislações pertinentes à saúde e ao meio ambiente mais amplas e com maior rigor. Adicionalmente, aspectos de sustentabilidade como balanço integral de energia, emissão de gases de efeito estufa associados a processos de tratamento, uso total de produtos químicos e a correspondente pegada de carbono, além do destino dos constituintes presentes nos efluentes (esgoto tratado) e em subprodutos gerados no processo de tratamento são, agora, de suma importância para o projeto, construção e a operação do tratamento do esgotos, considerando além da saúde e meio ambiente, aspectos econômicos, sociais, políticos, tecnológicos.

Além disso, as estações de tratamento antigas naturalmente têm que atender a legislação vigente referente a saúde e meio ambiente, mas devem também procurar se modernizarem buscando a sustentabilidade no aspecto amplo acima; já o projeto, construção e operação de novas ETEs deve considerar a sustentabilidade como premissa básica, onde a recuperação de energia e outros recursos devem ser sempre analisados.

A Figura 2.3 apresenta a nova estação de tratamento de esgoto a qual deveria ser vista como uma “indústria” apoiada nos pilares da sustentabilidade econômica, ambiental e social. O esgoto afluente deve ser considerado como um recurso, com o qual se pode gerar energia e recuperar subprodutos sólidos, líquidos e gasosos de valor comercial, tais como nutrientes, metais, produtos químicos, água de reuso, biossólidos, biogás, biometano, etc. Tal como uma indústria, deve ser pautada por uma operação eficiente atendendo a legislação ambiental.



Figura 2.3 – ETE Sustentável como uma indústria
Fonte: Possetti (2016)

Atualmente muito já se tem feito para se ter a ETE sustentável, mas é necessário ainda investir em pesquisa em diversas frentes, tais como os trabalhos do projeto *“Aplicação do conceito de biorrefinaria a estações de tratamento biológico de águas residuárias: o controle da poluição ambiental aliado à recuperação de matéria e energia”*, realizado pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) e financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP. O pesquisador responsável é o Prof. Marcelo Zaiat, que já vem realizando outras pesquisas na área de águas residuárias. O Projeto tem vigência de 1/6/2016 a 30/7/2021, conforme Zaiat (2016).

Segundo Zaiat (2016) *“o grande desafio desse projeto de pesquisa é estabelecer as bases para aplicar o conceito de biorrefinaria a uma estação de tratamento biológico de águas residuárias, com geração de biocombustíveis e de produtos de alto valor agregado. Tal concepção se baseia no emprego de reatores anaeróbios como unidades principais da estação, principalmente pelo fato desse processo ter como produtos finais uma grande variedade de ácidos orgânicos e solventes na fase líquida, além de hidrogênio e metano na fase gasosa. Nessa nova abordagem, águas residuárias predominantemente orgânicas são as matérias-primas do processo e a estação de tratamento, com seus equipamentos e reatores, constituem a rede de instalações para geração de produtos e subprodutos de alto valor agregado. Muitos desafios devem ser superados com essa nova concepção a começar pelas baixas concentrações de matéria orgânica encontradas em águas residuárias o que leva a geração de produtos também em baixas concentrações. A esse desafio se soma a complexidade da composição das águas residuárias, com variações temporais e espaciais. O uso de culturas microbianas mistas, embora seja uma grande vantagem para a biotecnologia anaeróbia, passa a ser um outro desafio para a concepção de biorrefinaria já que o controle do processo pode se tornar difícil. Para superar esses desafios, um grupo multidisciplinar de pesquisadores foi constituído com o objetivo de estabelecer os fundamentos de uma biorrefinaria alimentada com águas residuárias que gere energia e materiais de alto valor agregado além de cumprir com sua função principal de mitigação dos impactos ambientais de lançamento de despejos líquidos no ambiente”*.

Encontra-se em Chernicharo (2016) as principais linhas de pesquisa que são necessárias no Brasil para se ter a ETE sustentável no sentido amplo acima comentado; as quais são mostradas na Figura 2.4.

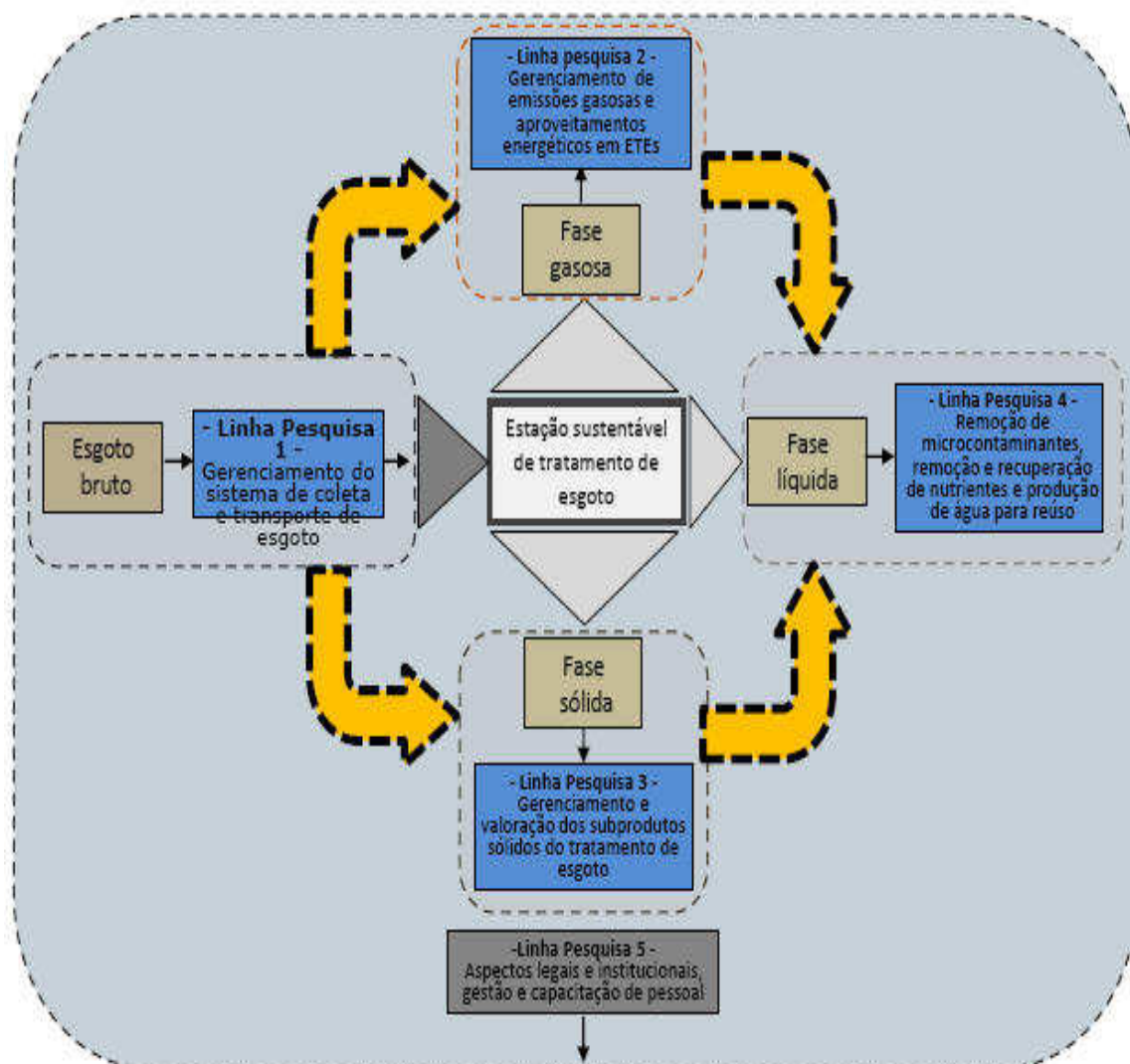


Figura 2.4 – ETE Sustentável – Linhas de pesquisa.
Fonte: Chernicharo (2016)

É neste contexto atual de sustentabilidade da nova estação de tratamento do esgoto, conforme apresentado por Jordão (2014), Metcalf & Eddy (2014), Possetti (2016), Chernicharo (2016) e Zaiat (2016), que o aproveitamento energético do biogás é inserido, o qual já é uma realidade nos países desenvolvidos juntamente com o aproveitamento do lodo na agricultura e a aplicação da água de reuso.

2.3.2 Processos básicos de tratamento de esgoto

2.3.2.1 Objetivos do tratamento do esgoto:

De um modo geral, os processos em uma ETE consistem em separar as partes líquidas e sólidas do esgoto, para tratá-las separadamente, no que é denominado tratamento da fase líquida e tratamento da fase sólida (lodos), reduzindo ao máximo a carga poluidora, sem que o meio ambiente seja prejudicado, e que não seja um vetor de doenças. Conforme Chernicharo et al. (2008) os principais objetivos do tratamento do esgoto são:

a) Remoção de sólidos em suspensão

A remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis bem como de materiais flutuantes e de parte da matéria orgânica em suspensão, presentes nos esgotos, é realizada no tratamento primário (decantadores primários) e visa à proteção ambiental, evitando o aumento da turbidez e o assoreamento do corpo d'água receptor.

b) Remoção de matéria orgânica

A remoção de matéria orgânica é, usualmente, o principal objetivo do tratamento de esgotos, visando à preservação ambiental. Na estação de tratamento, a remoção de matéria orgânica (DBO e DQO) ocorre, principalmente, nos reatores biológicos.

c) Remoção de organismos patogênicos

A contaminação do corpo receptor por agentes patogênicos é o aspecto de maior importância na avaliação dos impactos sobre a saúde, decorrentes do lançamento de esgoto nos corpos d'água. Por isso, em estações de tratamento de esgotos, busca-se a remoção desses organismos, alcançada por meio da utilização dos seguintes fatores e mecanismos de remoção: *Bactérias e vírus*: Temperatura, insolação, pH, escassez de alimentos, competição, entre outros; *Cistos de protozoários e ovos de helmintos*: Sedimentação

d) Remoção de nutrientes

Os objetivos da remoção de nutrientes (Nitrogênio e Fósforo) nas estações de tratamento também estão diretamente relacionados aos impactos causados pelo seu aporte nos corpos receptores. Dessa forma, busca-se remover a amônia para evitar o consumo de oxigênio dissolvido (OD) no corpo d'água em decorrência da sua oxidação (nitrificação). A remoção de cada um desses poluentes ocorre em níveis diferentes de tratamento, conforme apresentado a seguir.

2.3.2.2 Processos de tratamento do esgoto

Conforme Jordão (2014), da mesma forma que os poluentes presentes no esgoto são de natureza física, química e biológica, os processos de tratamento de esgoto podem ser classificados em processos físicos, processos químicos e processos biológicos, aplicados em uma série de operações unitárias para a remoção de substâncias indesejáveis, ou para a transformação destas substâncias em outras de forma aceitável.

É comum classificar as instalações de tratamento em função do grau de remoção de sólidos em suspensão e da demanda bioquímica ou química de oxigênio proveniente da eficiência de uma ou mais unidades de tratamento, sendo usual a seguinte denominação para as instalações, segundo Von Sperling (2014):

- a) Tratamento Preliminar,
- b) Tratamento Primário,
- c) Tratamento Secundário
- d) Tratamento Terciário.

O tratamento preliminar emprega principalmente processo físico e tem o objetivo de remover do esgoto os sólidos grosseiros e areia. A remoção dos sólidos grosseiros é feita frequentemente por meio de grades, que podem ser grossas médias e finas, dependendo do espaçamento entre as barras, mas pode também ser feita por meio de peneiras rotativas, estáticas ou trituradores

O tratamento primário tem por objetivo remover do esgoto os sólidos flutuantes e sólidos em suspensão sedimentáveis de porte pequeno, não removidos no tratamento preliminar, cuja remoção pode ser feita em unidades de sedimentação, reduzindo a quantidade de matéria orgânica contida no esgoto. Os sólidos sedimentáveis e flutuantes são retirados por meio de mecanismos físicos, via decantadores.

O tratamento secundário é a etapa da remoção biológica dos poluentes e sua eficiência permite produzir um efluente em conformidade com o padrão de lançamento previsto na legislação ambiental.

O tratamento terciário é aplicado eventualmente e objetiva remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis) ou ainda, a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário. O Apêndice B – Processos de tratamento de esgoto sanitário, apresenta mais informações sobre os tratamentos acima.

2.3.3 Gerenciamento de lodo como oportunidade para o biogás

O lodo residual do processo de tratamento de esgoto é considerado um resíduo semissólido que requer disposição final adequada, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos- PNRS - Lei Nº 12.305/2010.

Com a aprovação da Lei Nº 12.305/2010 que determinou a data de 2014 (posteriormente alterada pelo Projeto de Lei do Senado PL 2289/2015 para 31/7/2018 a 31/8/2012¹ – prazo depende da quantidade de habitantes de cada município) para que apenas a parte não aproveitável dos resíduos (rejeitos) pode ser encaminhada para aterros sanitários. Isso significa que o lodo das ETEs que atualmente são enviados para aterro sanitário na sua maioria, precisará ser submetido a todos os processos possíveis de tratamento e recuperação por meio das tecnologias disponíveis e economicamente viáveis, antes de serem depositados num aterro sanitário.

O gerenciamento do lodo representa, juntamente com o consumo de energia, um custo operacional significativo para as prestadoras de serviço de saneamento, principalmente devido aos custos de transporte e disposição final, variando de 20 a 60% do custo operacional total de uma ETE. (Von Sperling, 2014)

As empresas de saneamento estão buscando reduzir os custos com o gerenciamento do lodo, e uma alternativa é fazer o aproveitamento energético do biogás, à exemplo do que é apresentado em Sabesp (2016), onde uma Estação de Processamento de Biogás e Lodo – EPBL, para a ETE de Barueri/SP da Sabesp - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, está em fase de consulta pública para em seguida iniciar a licitação, para o processamento de 500 toneladas/dia de lodo para converter em lodo seco, e 50.000 Nm³/dia de biogás. A potência instalada da EPBL será inicialmente de 5 MW e após 5 anos de operação deverá ser expandida para 10 MW, com previsão de receber até 100.000 Nm³/dia de biogás.

O Apêndice C – Gerenciamento de lodo, apresenta informações adicionais sobre o gerenciamento do lodo e sobre o projeto da Sabesp acima mencionado.

3. BIOGÁS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO - ETE

3.1 Processos biológicos anaeróbicos como origem do Biogás de ETE's

Conforme visto no capítulo 2, a remoção de matéria orgânica é, usualmente, o principal objetivo do tratamento de esgotos sanitários, visando à preservação ambiental. Na estação de tratamento, a remoção de matéria orgânica (DBO) ocorre, principalmente, nos reatores biológicos. O Anexo B apresenta a concentração típica de matéria orgânica (DBO_5) presente nos esgotos sanitários, cujo valor típico é 300 mg/L conforme Silveira et al. (2015)

Os processos biológicos de tratamento de esgoto que ocorrem nos reatores utilizados no tratamento secundário, podem ser classificados em: *aeróbios*, quando se utiliza microrganismos que necessitam continuamente de oxigênio dissolvido, *anaeróbios*, quando se utiliza microrganismos que crescem na ausência de oxigênio e *facultativos*, quando se utiliza microrganismos que podem atuar nas duas condições.

A Figura 3.1 apresenta as rotas de conversão de matéria orgânica no sistema anaeróbico e no sistema aeróbico. Observa-se que no reator anaeróbico do total (100%) da matéria orgânica que entra no reator, 50 a 80% é convertida em biogás, 5 a 15% é convertida em lodo biológico e entre 10 a 30% da DQO que não é convertida em biogás ou lodo biológico sai junto com o efluente; já no reator aeróbico do total de DQO que entra no reator, 40 a 50% é convertida em dióxido de carbono, 30 a 40% é convertida em lodo biológico e entre 5 a 15% da DQO que não é convertida em dióxido de carbono ou lodo biológico sai junto com o efluente.

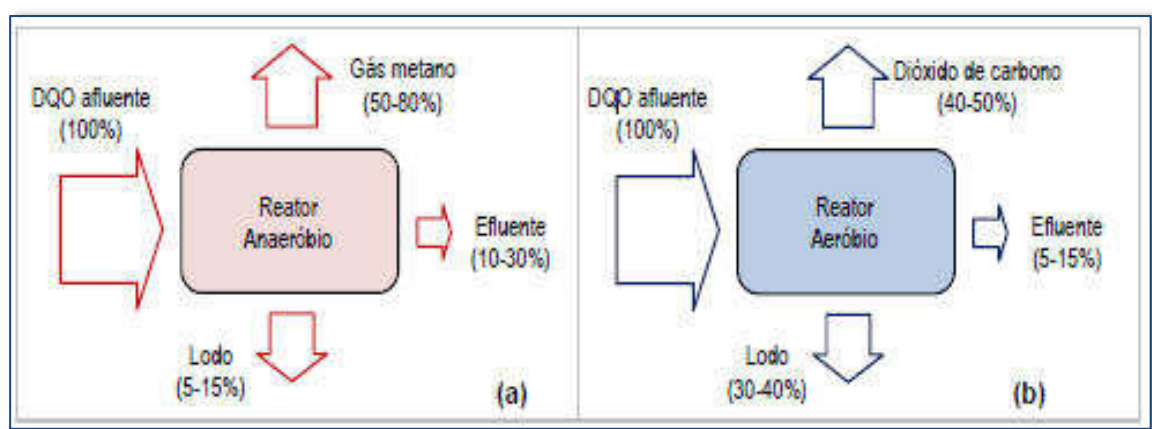


Figura 3.1 - Rotas de conversão de matéria orgânica. a) Reator anaeróbico; b) Reator aeróbico. Fonte: Chernicharo (2007).

Comparando a produção do lodo mostrada na Figura 3.1, verifica-se que o processo anaeróbico é vantajoso em comparação com o aeróbico, pois quanto menor o volume do lodo gerado, menor o custo com o gerenciamento do lodo. Já quanto à eficiência do tratamento, o processo aeróbico apresenta melhor resultado que o anaeróbico, pois apresenta um percentual menor que o anaeróbico de DQO no efluente.

Considerando as características dos reatores aeróbicos e anaeróbicos, é comum ter estações de tratamento aproveitando as características de ambos os sistemas, ou seja:

- Sistemas com reatores UASB (anaeróbicos) que geram menos lodo, seguidos de pós-tratamento com lodos ativados (aeróbico), à exemplo da ETE Piçarrão, da Sanasa – Campinas/SP.

- Sistemas de tratamento de lodo ativado convencional com reator anaeróbico para a fase líquida (melhor remoção de DQO) e digestor anaeróbico de lodo para a fase sólida, à exemplo das ETEs metropolitanas da Sabesp – SP.

O Anexo B apresenta informações adicionais sobre os processos de tratamento de esgoto sanitário.

3.2 Digestão anaeróbica: rotas metabólicas e fatores que influenciam a digestão anaeróbica

Verifica-se em (Lobato, 2011) que na digestão anaeróbia diversos grupos de bactérias trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas.

A Figura 3.2 mostra que no processo de digestão anaeróbia ocorre a atividade conjunta de ao menos quatro grupos de bactérias distintas: as bactérias fermentativas ou acidogênicas, as bactérias acetogênicas, as bactérias metanogênicas e as bactérias sulfetogênicas, atuando nas 5 fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese.

O objetivo aqui não é descrever os processos envolvidos na digestão anaeróbica conforme rotas indicadas na Figura 3.2, mas sim salientar que o processo é complexo e que a manutenção do balanço adequado das condições de atuação dos distintos grupos de bactérias é fundamental à geração de biogás.

Diversos fatores influenciam a digestão anaeróbica, podendo-se destacar segundo Silveira et al. (2015):

- Temperatura do processo anaeróbico
- Interações de PH, alcalinidade e ácidos orgânicos
- Concentração da matéria orgânica do substrato
- Concentração de nutrientes nos substratos
- Inibição e Toxicidade

Encontra-se em Silveira et al. (2015) que a temperatura é um dos mais importantes fatores físicos que afetam o crescimento microbiano. Os microorganismos não possuem meios de controlar a sua temperatura interna e, dessa forma, a temperatura no interior da célula é determinada pela temperatura externa; três faixas de temperatura podem ser associadas ao crescimento microbiano na maioria dos processos biológicos: Faixa psicrófila: entre 4 e 15 °C; Faixa mesófila: entre 20 e 40 °C; Faixa termófila: entre 45 e 70 °C. Pode-se identificar em cada faixa três valores para caracterizar o crescimento das espécies de microorganismos: temperatura mínima, máxima e ótima, conforme indicado no Gráfico 3.1.

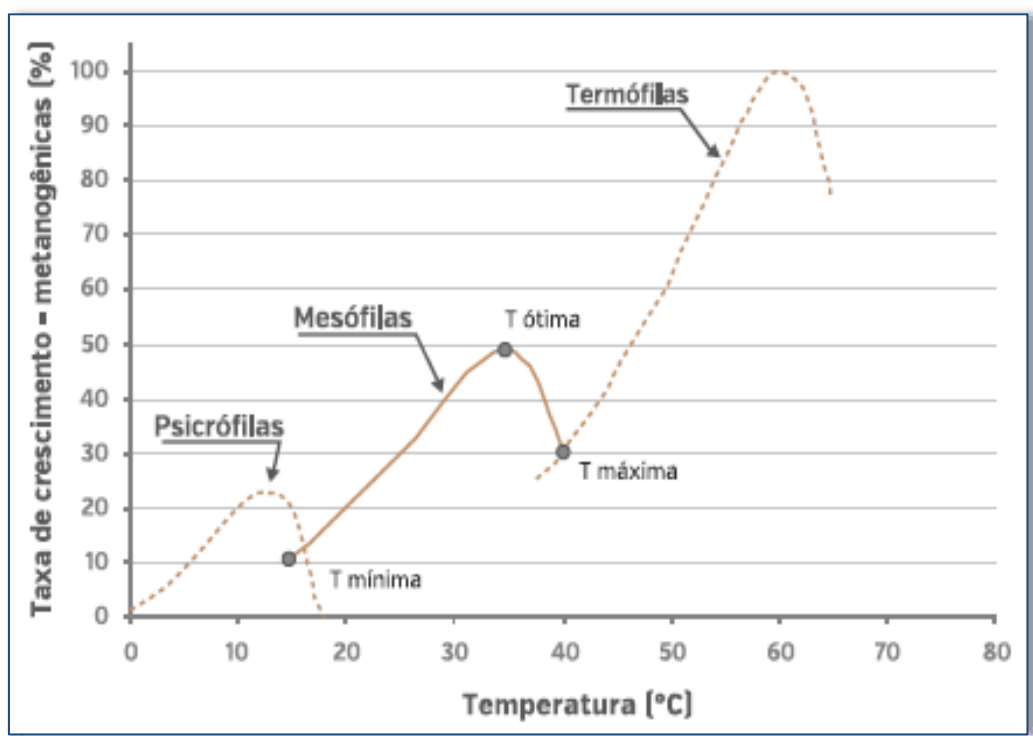


Gráfico 3.1 – Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento das archaeas Metanogênicas.

Fonte: Silveira et al. (2015)

A maioria dos digestores anaeróbicos têm sido projetados na faixa mesófila e para operação na temperatura ótima em torno de 35 °C, onde a faixa de crescimento é máxima Batstone et al. (2002 apud Chernicharo (2007)

Os microorganismos formadores de metano, predominantes em digestores anaeróbicos operados na faixa mesófila de temperatura, são as arqueas metanogênicas, utilizadoras de hidrogênio (hidrogênitróficas) e o acetato (acetoclásticas) para a formação do metano, conforme indicado na Figura 3.2

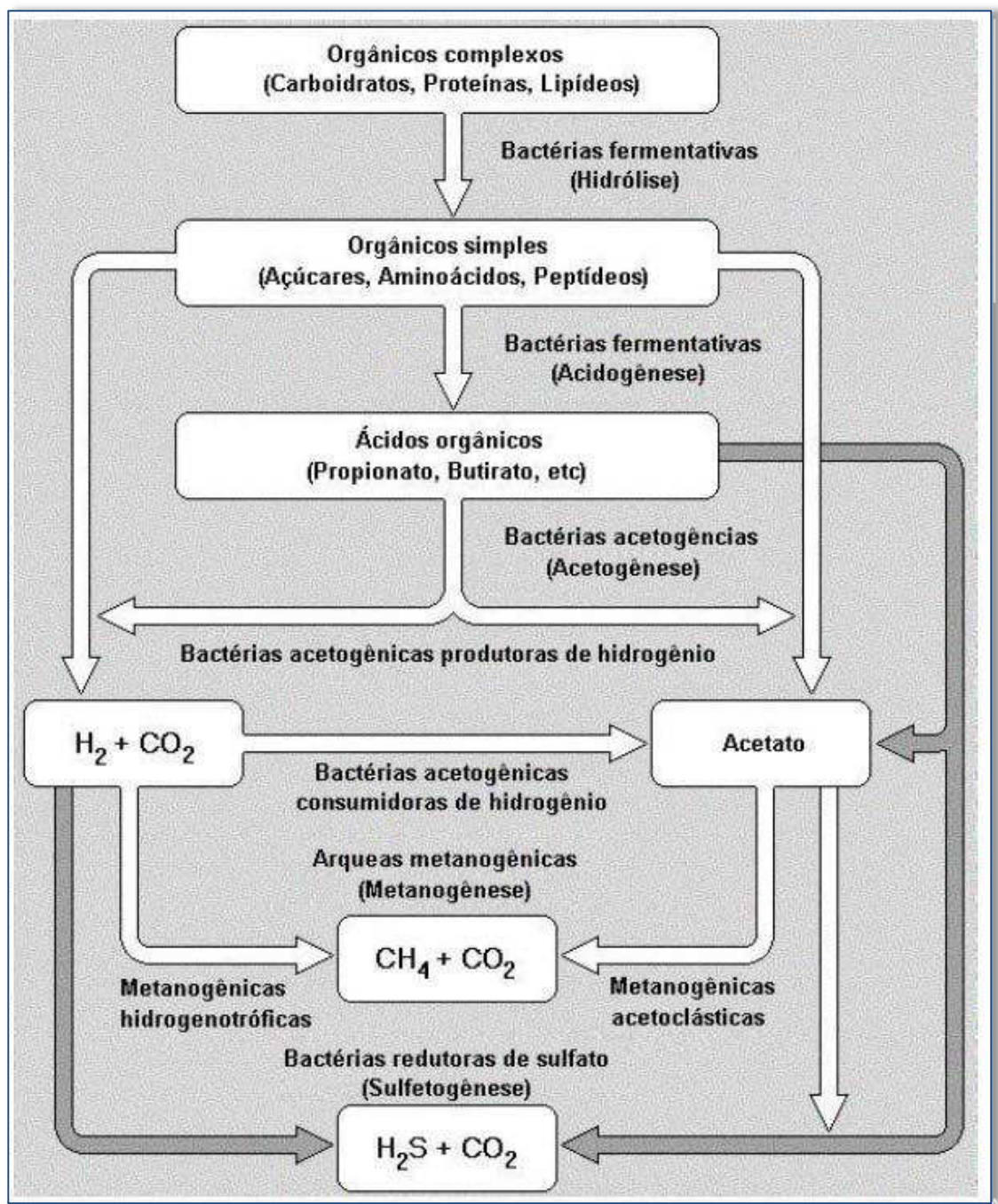


Figura 3.2 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbica

Fonte: adaptado de Lettinga et al. (1996) apud Chernicharo (2007)

3.3 Características do biogás de ETE.

O biogás proveniente do tratamento de esgoto sanitário em ETE é uma mistura de gases gerados durante a digestão anaeróbica, sendo composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), nas seguintes proporções típicas: Silveira et al. (2015)

a) Biogás de tratamento anaeróbico de esgoto sanitário:

Metano (CH_4): 60 – 85% em vol.; Dióxido de Carbono (CO_2): 5 a 15% em vol.

b) Biogás de tratamento anaeróbico de lodo; Metano (CH_4): 60 – 70% em vol.; Dióxido de Carbono (CO_2): 20 a 40% em vol.

A Tabela 3.1 apresenta as principais características típicas do biogás em reatores anaeróbicos tratando esgoto sanitário e digestores de lodo.

Tabela 3.1 - Principais características típicas do biogás em reatores anaeróbicos tratando esgoto sanitário e digestores de lodo

COMPONENTE	UNIDADE	BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO SANITÁRIO	BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE LODO
Metano (CH_4)	% em vol.	60 – 85	60 – 70
Dióxido de carbono (CO_2)	% em vol.	5 – 15	20 – 40
Monóxido de carbono (CO)	% em vol.	0 - 0,3	–
Nitrogênio (N_2)	% em vol.	2 – 25*	0 – 2
Hidrogênio (H_2)	% em vol.	0 – 3	0 – 1,5
Amônia (NH_3)	% em vol		< 0,05
Número de metano	–		> 100
Poder calorífico superior (PCS)	kWh/Nm ₃	6,6 – 9,4	6,6 – 7,7
Poder calorífico inferior (PCI)	kWh/Nm ₃	6,0 – 8,5	6,0 – 7,0
Índice de Wobbe	kWh/Nm ₃	7,0 – 13,4	7,0 – 9,1
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	ppm	1.000 a	500 – 1.500
Enxofre total (S)	mg/Nm ₃		20 – 2.500
Halogênios	mg/Nm ₃		0 – 100
Cloro (Cl)	mg/Nm ₃		1– 5
Flúor (F)	mg/Nm ₃		1– 5
Poeira/partículas (< 10 μm)	mg/Nm ₃		N.E.
Total de compostos orgânicos com silício	mg/Nm ₃		< 40
Compostos aromáticos	mg/Nm ₃		< 10 em 100% CH_4
Umidade relativa	%		90 – 100
Teor de oxigênio (O_2)	% em vol.	0 – 2	0 – 1

Fonte: Silveira et al. (2015)

A Tabela 3.2 apresenta as características do biogás em comparação com o gás natural e o gás de síntese, onde observa-se que o PCI (PCI – poder calorífico inferior - calor de combustão menos o calor do vapor de água presente no gás) é 5.134 Kcal/m³ para o biogás.

Tabela 3.2 - características de diferentes tipos de gases.

PARÂMETRO	UNIDADE	GÁS NATURAL	GÁS DE SÍNTESE	BIOGÁS (60% CH ₄)
Poder calorífico inferior	MJ.m ⁻³	31,8	16,1	21,5
	kcal.m ⁻³	7.600	3.846	5.134
Densidade	kg.m ⁻³	0,82	0,51	1,21
Índice de Wobbe (inferior)	MJ.m ⁻³	39,9	22,5	19,5
Velocidade máxima de chama	m.s ⁻¹	0,39	0,7	0,25
Requisito teórico de ar	m ³ ar. m ⁻³ gás	9,53	3,83	5,71
Concentração máxima de CO ₂ após combustão	% (v)	11,9	13,1	17,8
Ponto de condensação	°C	59	60	60-160

Fonte: Silveira et al. (2015)

A Tabela 3.3 apresenta o poder calorífico inferior do biogás e de outros combustíveis e equivalência com o metano

Tabela 3.3 - Poder calorífico inferior do biogás e de outros combustíveis e equivalência com o metano.

Combustível	MJ.kg ⁻¹	MJ.Nm ⁻³	kWh.Nm ⁻³	Equivalência ao metano
Gases				
Metano	50,0	35,9	10,0	1,0
Gás natural	45,1	31,8	8,8	0,9
Biogás típico (60% CH ₄)	30,0	21,5	6,0	0,6
Butano	45,7	118,5	32,9	3,3
Propano	46,4	90,9	25,2	2,5
Líquidos				
Metanol	19,9	15.900	4.415,4	442,9
Etanol	26,9	21.400	5.942,8	596,1
Gasolina	45,0	33.300	9.247,4	927,6
Diesel	42,1	34.500	9.580,7	961,0

Fonte: Lobato (2011)

3.4 Tratamento do Biogás de ETE

Conforme visto nos itens acima, o biogás apresenta em sua composição, metano, dióxido de carbono e uma grande variedade de contaminantes, como sulfeto de hidrogênio e outros compostos sulfurados, vapor d'água, siloxanos, amônia e compostos orgânicos voláteis (COVs), cuja presença e composição dependem do tipo de substrato a partir do qual o biogás foi gerado.

Conforme Siveira et al. (2015) para a utilização do biogás, é necessário projetar tecnologias que tratem o biogás até o nível exigido pelo tipo de aproveitamento.

De modo geral, existe uma diferença clara entre a utilização de biogás e de biometano. O biogás, depois da remoção das principais impurezas como umidade, siloxanos e, principalmente, H_2S , pode ser utilizado para a produção de energia elétrica (CHP) e energia térmica (aquecer, secar, resfriar).

Já o biometano é o resultado de uma purificação muito mais exigente conforme indicado na Figura 3.3 e pode ser utilizado como substituto do gás natural veicular (GNV), sendo necessária, ainda, uma compressão e posterior armazenamento. Atualmente a Resolução ANP Nº8, de 30.01.2015 não permite a injeção de biometano oriundo de ETEs e de resíduos sólidos urbanos na rede de gás natural no Brasil, em função principalmente de preocupações quanto à presença de siloxanos que tipicamente existem nestes resíduos, porém, esta aplicação na rede de GNV pode vir a ser uma opção futura, em função de maiores informações disponíveis para a ANP, conforme Flores (2016). Os Siloxanos, conforme Zuffo (2012), são compostos de sílica que estão diretamente ligados a quantidade de cosméticos e produtos de higiene pessoal, principalmente pasta de dente. Acarretam, ao longo do tempo, problemas pela formação de grãos de sílica (areia) no interior dos equipamentos acarretando corrosão e incrustação nos equipamentos.

A Figura 3.3 mostra os tratamentos usualmente aplicados para atingir a adequação aos requisitos da aplicação e/ou equipamento que está sendo utilizado para a conversão energética; outros tratamentos devem ser considerados conforme a aplicação.

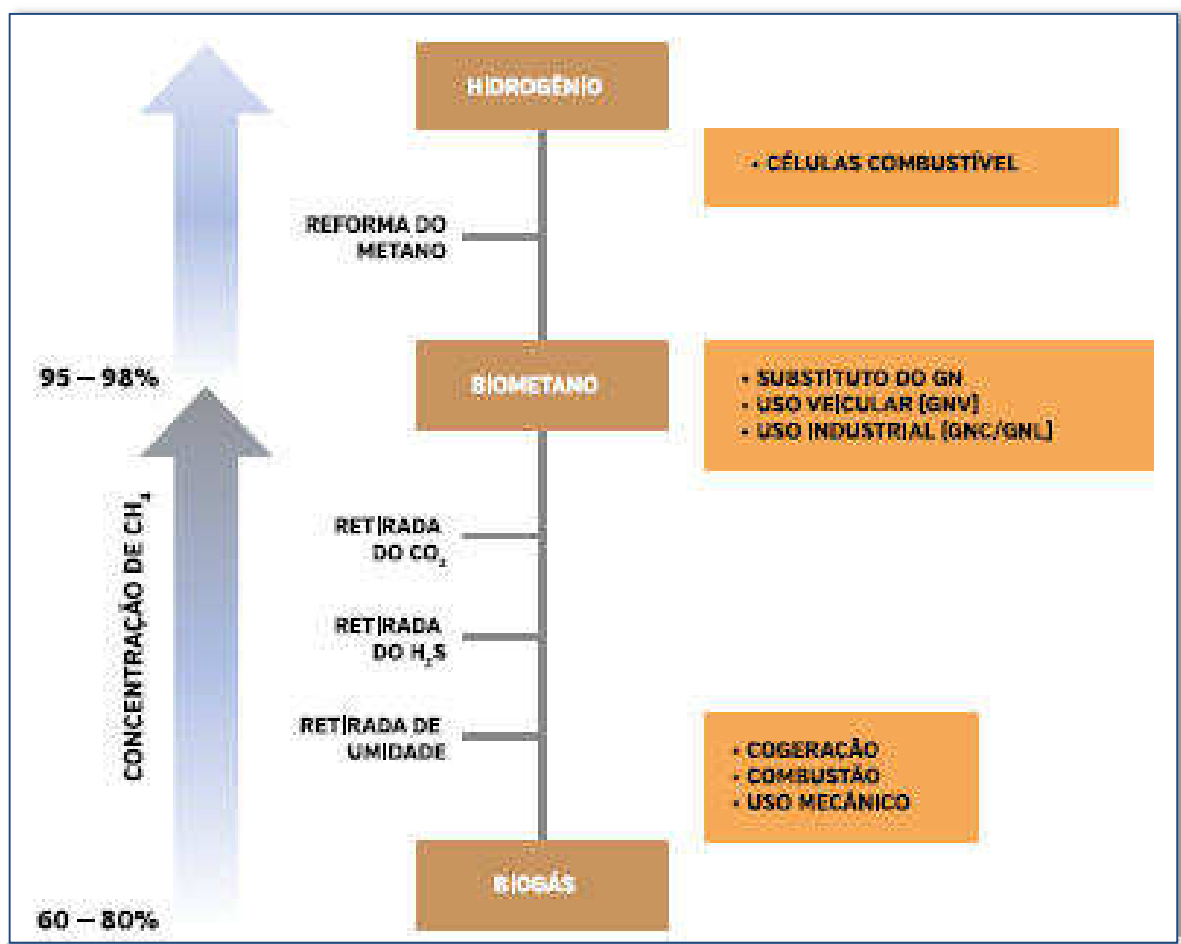


Figura 3.3 - Necessidade de tratamento conforme uso final
Fonte: Thieme et al. (2015)

O biogás pode ser recuperado para diversos fins, tais como:

- Combustível em caldeiras, fornos e estufas em substituição aos outros tipos de combustíveis;
- Geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia;
- Cogeração de eletricidade e calor; e
- Combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou ao aproveitamento como combustível veicular, sendo que cada aproveitamento requer um tratamento específico.

A Tabela 3.4 apresenta os tratamentos usuais para as aplicações indicadas.

Tabela 3.4 - Níveis de tratamento requerido para diferentes tipos de uso do biogás

Tipo de uso do	Nível de tratamento			Outros requisitos
	Remoção de água	Remoção de H ₂ S	Remoção de CO ₂	
Combustão direta (queimadores abertos e fechados)	Tratamento parcial	Nenhum a tratamento parcial (H ₂ S < 5 ppmv no caso de queimadores fechados**)	Nenhum tratamento	De-foaming (controle de espuma) Compressão Temperatura ≥ 900°C Tempo de residência ≥ 0.3s Hidrocarbonetos ≤150 mg/m ³
Uso direto para geração de calor (ex. combustível para caldeiras e aquecedores)	Tratamento parcial	Nenhum a tratamento completo	Nenhum tratamento	-
Cogeração de eletricidade e calor a partir de motores de combustão interna	Tratamento parcial a completo	Tratamento parcial a completo***	Nenhum a tratamento completo	-
Cogeração de eletricidade e calor a partir de turbinas e microturbinas	-	Turbina (H ₂ S < 10000 ppmv)*** Microturbina (H ₂ S<50ppmv)***	-	Pressão do combustível nas microturbinas: 345-552kPa
Injeção na rede de gás natural	Tratamento completo (umidade < 70-80%)	Tratamento completo (H ₂ S < 5 mg/m ³)	Tratamento completo (CH ₄ ≥ 95%)	Compressão: 60-70 bar
Motores a gás (ex.: combustível veicular)	Tratamento completo (umidade< 70-80%)	Tratamento completo (H ₂ S < 1000-2000 mg/m ³)	Tratamento completo	Compressão: 200 bar Teor energético: 13-21 MJ/m ³

Fonte: Lobato (2011)

A necessidade de tratamento do biogás demanda equipamentos adicionais cujo custo pode inviabilizar economicamente o projeto no uso desejado.

4. PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ETE: REATOR UASB E DIGESTOR DE LODO

4.1 Introdução

Conforme Jordão (2014) a evolução recente do tratamento anaeróbico conduziu a que os esgotos, e não apenas o lodo, possam ser tratados em unidades dimensionadas para tal fim. Apesar do tratamento anaeróbico ter se firmado como solução clássica para a estabilização do lodo de esgotos domésticos, apenas recentemente a aplicação da biotecnologia anaeróbica foi estendida ao tratamento de despejos líquidos. A biotecnologia anaeróbica é recente, e o conhecimento da cinética e das aplicações de modelagem matemática é ainda limitada.

O tratamento anaeróbico produz biogás, sendo que as principais tecnologias anaeróbicas que possibilitam a produção e uso energético de biogás em ETEs, conforme Silveira et al. (2015), são:

- Reatores UASB para o tratamento de esgoto e
- Digestores de lodo para o tratamento de lodo.

A tecnologia de tratamento com digestores de lodo é tradicional, com o domínio da tecnologia consolidado e amplo uso no exterior fazendo o aproveitamento do biogás.

Já a tecnologia UASB não é dominada totalmente para o aproveitamento do biogás. Segundo Valente (2015), o sistema UASB é muito comum no tratamento de esgotos domésticos no Brasil, porém é pouco utilizada em outros países, o que justifica o baixo desenvolvimento desta tecnologia, já que poucas pesquisas foram realizadas para o aproveitamento do biogás de reatores UASB.

Conforme Sobrinho (2011), a experiência brasileira com os reatores UASB teve uma grande revolução nos anos 1980/1990, porém resultou em fracasso, devido a não se dar a devida atenção ao desenvolvimento da tecnologia. A partir de 1996, com o projeto PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico com apoio do Governo Federal para pesquisa e desenvolvimento de tecnologia e financiamento do FINEP) deu um novo impulso ao uso de reatores UASB, sendo que o estado do Paraná foi quem mais adotou a tecnologia.

Atualmente, segundo Chernicharo (2016), a grande aceitação da tecnologia anaeróbia no Brasil com reatores UASB nos credencia a sermos protagonistas no mundo tropical na busca por ETEs energeticamente sustentáveis; porém ainda existem importantes limitações de projeto, construtivas e operacionais que precisam ser vencidas; os projetos de reatores devem priorizar os aspectos relacionados à

captura do biogás e à minimização/eliminação das emissões fugitivas de metano e de sulfeto. Além disso, tem-se que cuidar para que a aceitação generalizada da tecnologia anaeróbia seja responsável e não coloque em risco sua credibilidade.

Segundo Sobrinho (2011) as maiores ETE's e respectivos capacidades de tratamento utilizando reatores UASB's no Brasil são: ETE Onça, Belo Horizonte, 3,35 m³/s; ETE Atuba Sul, Curitiba, 1,12 m³/s; ETE Sul, Londrina, 1,16 m³/s; ETE Norte, Londrina, 0,85 m³/s; ETE Santa Quitéria, Curitiba, 0,56 m³/s; ETE Piçarrão, Campinas, 0,56 m³/s; ETE Anhumas, Campinas –1,2 m³/s; ETE Los Angeles – Campo Grande –0,72 m³/s e ETE São José do Rio Preto, SP -1,34 m³/s

4.2 Reatores UASB

4.2.1 Reatores UASB – Princípio operacional

Segundo Jordão (2014) o modelo de reator anaeróbico surgiu na Holanda em nos anos 70 e foi desenvolvido pelo Prof. Gatze Lettinga e sua equipe, na Universidade de Wageningen, e recebeu o nome de “Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors, UASB” – terminologia recentemente adotada pelos especialistas brasileiros.

A Figura 4.1 apresenta uma representação esquemática do reator UASB

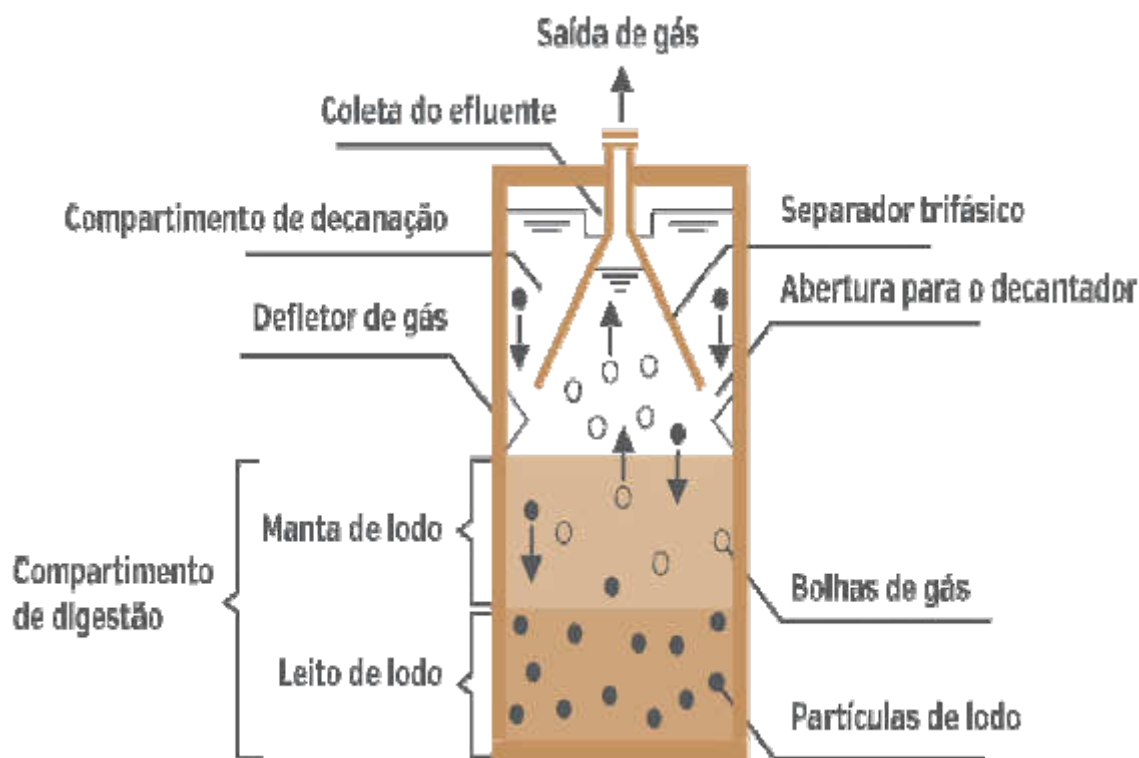


Figura 4.1 - Representação esquemática de um reator UASB
Fonte: Silveira et al. (2015)

O reator caracteriza-se por possuir a entrada do esgoto pelo fundo, em fluxo ascendente, e por dispor de um sistema, chamado separador trifásico, de separação das fases líquida, sólida e gasosa, na parte superior, com o lodo suspenso e formando flocos e grânulos.

4.2.2 Reatores UASB - Vantagens e desvantagens

O processo do tratamento de esgoto doméstico dentro de reatores UASB apresenta inúmeras vantagens em relação aos processos aeróbios convencionais, notadamente quando aplicado em locais de clima quente, como é o caso da maioria dos países em desenvolvimento.

A Tabela 4.1 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos reatores UASB.

Tabela 4.1 – Reatores UASB – Vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
• Baixa produção de sólidos, cerca de 2 a 8 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios; • Baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada, fazendo com que tenham custos operacionais muito baixos; • Baixa demanda de área; • Baixos custos de implementação, na ordem de 20 a 30 dólares per capita; • Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico; • Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses; • Tolerância a elevadas cargas orgânicas; Aplicabilidade em pequena e grande escala.	• Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória; • Produção de efluente com aspecto desagradável e usualmente com qualidade insuficiente para atender os padrões ambientais. Em decorrência, alguma forma de pós- tratamento é normalmente necessária; • Possibilidade de distúrbios devido a choques de carga orgânica e hidráulica, presença de compostos tóxicos ou ausência de nutrientes; • A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semeadura adaptado; • A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas; • Possibilidade de geração de maus odores e de problemas de corrosão, porém controláveis.

Fonte: Chernicharo (2007)

Embora os reatores UASB incluam amplas vantagens, principalmente no que diz respeito a requisitos de área, simplicidade e baixos custos de projeto, implantação, operação e manutenção, algumas desvantagens ainda são atribuídas aos mesmos:

Segundo Lobato (2011), em que pesem suas grandes vantagens e ampla utilização, os reatores UASB ainda apresentam algumas limitações, não completamente solucionadas até o presente; caso adequadas diretrizes para projeto, construção e operação não forem disponibilizadas e seguidas em curto espaço de tempo, a tecnologia pode ser desacreditada e a sua aplicação reduzida.

4.2.3 Estimativa de produção de biogás em reatores UASB e melhorias

Há diversos métodos identificados na literatura segundo Silva (2015) para estimar a produção de biogás em reatores UASB, os quais são apresentados na Figura 4.2.

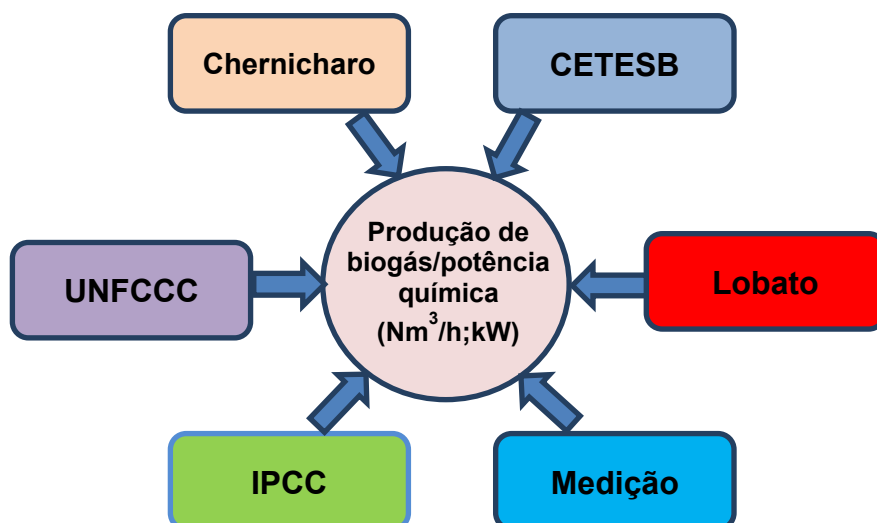


Figura 4.2 – Métodos para estimativa do potencial de produção de biogás reportados na literatura.
Fonte: Adaptado de Silva (2015)

Em Silva (2015) é apresentado os resultados das estimativas de produção de biogás (Nm^3/hora) e das medições realizadas em campo na ETE Atuba Sul da Sanepar/PR, com capacidade de tratamento de 1120 l/s, tratando esgoto sanitário de cerca de 420.000 pessoas das cidades de Curitiba e outras 5 cidades. As medições operacionais (total de 83) foram realizadas no período de 1/10/2011 a 1/10/2012 com intervalo de semanas em média.

Quanto ao biogás foi feita medição de vazão e teor de metano em linha com intervalo de cerca de 30s; o resultado está apresentado Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Comparação dos dados medidos em campo e os dados calculados pelos métodos reportados na literatura.

Método	Vazão de biogás (Nm ³ /h)	Vazão de metano (Nm ³ /h)	Potência química disponível (Nm ³ /h)
Dados de Campo	84,30 ± 26,64	53,33 ± 15,04	526,04 ± 166,24
Lobato (2011)	225,26 ± 143,71	181,99 ± 143,71	1801,07 ± 882,80
CETESB (2006)	303,26 ± 86,07	176,18 ± 51,64	1744,18 ± 537,11
UNFCCC (2011)	519,99 ± 194,27	311,40 ± 116,56	3082,86 ± 1212,22
Chernicharo (1997)	546,75 ± 205,45	328,05 ± 123,27	3247,69 ± 1282,01
IPCC (2006)	688,63 ± 202,85	413,18 ± 121,71	4090,48 ± 1265,81

Fonte: Silva (2015)

Observa-se a grande variação entre os dados medidos e os dados calculados, o que segundo Silva (2015) é devido à que os métodos propostos pelo IPCC(2006), pela CETESB(2006), pelo UNFCCC(2013) e por Chernicharo (1997) não considerarem as perdas de metano, assim como algumas importantes rotas de conversão de DQO durante o tratamento anaeróbico do esgoto, conforme considerados no método de Lobato (2011).

Além disso, considerando o método de Lobato (2011), Silva (2015) concluiu que a ETE Atuba produziu menos biogás que o previsto no método, o que indica que a ETE poderia estar com problemas em sua operação ou estruturais, que aumentavam as perdas e diminuam a disponibilidade de biogás; mesmo havendo perdas de biogás, o aproveitamento energético do biogás gerado na ETE Atuba chega próximo da autossuficiência, ou seja, o biogás supre quase toda a necessidade energética da ETE. A potência elétrica calculada de acordo com Silva (2015) foi de 233 KW.

O item 4.2.4 a seguir apresenta outras medições realizadas em diversas ETEs e também as compara com o método Lobato (2011).

O método de Lobato (2011) é utilizado no software ProBio 1.0, descrito em Possetti (2015). O Anexo D apresenta maiores informações sobre o método Lobato (2011)

4.2.4 Medição e comparação de potencial de produção de biogás em ETEs

Similarmente às medições apresentadas por Silva (2015), Cabral (2016) apresenta o projeto de medições realizadas em 5 ETE's objetivando avaliar o potencial de geração de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbicos tipo UASB em escala plena a partir de medições. Foram instalados medidores em 10 ETEs, mas somente 5 tiveram dados consolidados à época da apresentação em Cabral (2016).

O projeto apresentado por Cabral (2016) é parte do projeto em andamento do projeto Probiogás, executado pela empresa consultora do projeto Rotária do Brasil, em convênio com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

A Figura 4.3 apresenta o esquema típica de medição aplicado em cada estação. Os medidores em sua maioria foram fornecidos pelo projeto Probiogás e são na maioria importados.

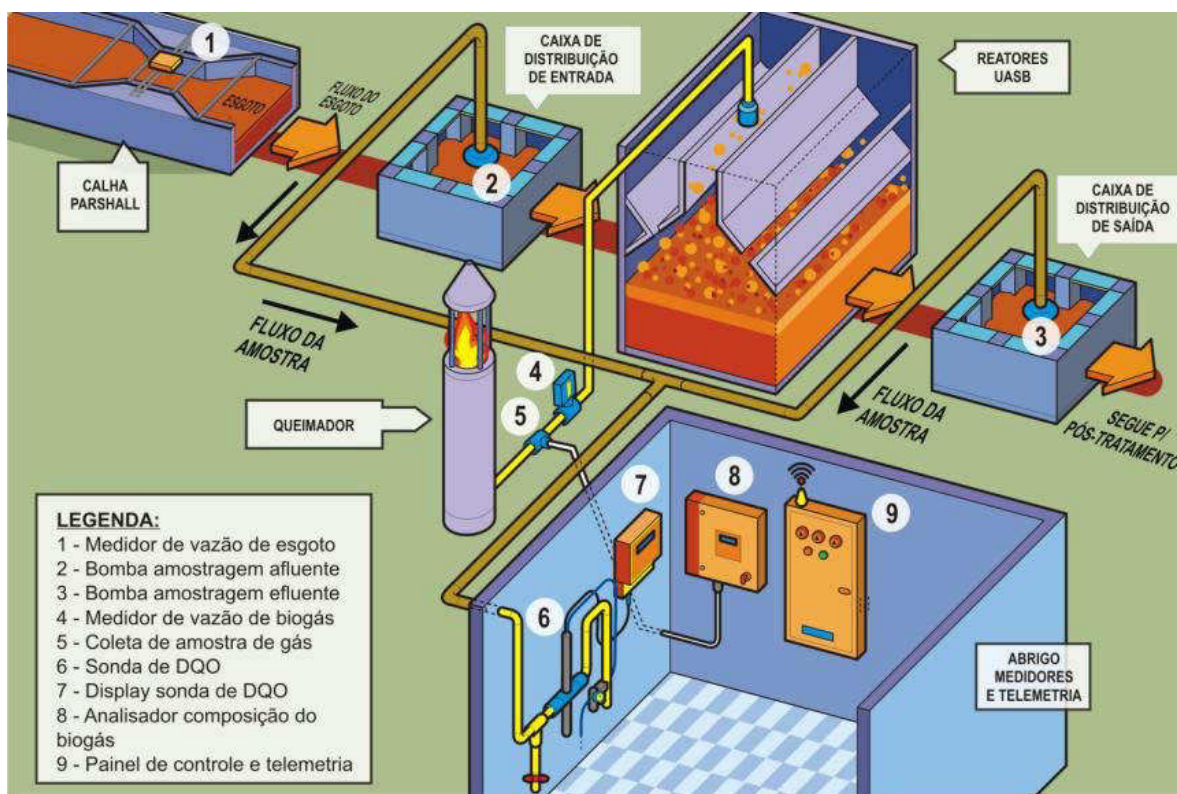


Figura 4.3 - Esquema geral de medição nas 5 ETEs
Fonte Cabral (2016)

É apresentado na Tabela 4.3 as principais características das ETEs monitoradas, e os resultados médios obtidos nos períodos de medição, sendo:

- ETE A: UASB + Lagoa aerada;
- ETE C: RALF + Filtro aeróbio percolador
- ETE D: UASB + Lagoa de alta taxa
- ETE F: UASB + Lodo ativado
- ETE J: UASB + Lodo ativado

Tabela 4.3 - Principais características da ETES monitoradas – Fonte Cabral (2016)

ETE	Período	DQO _{afl} (mg/L)	Q esgoto (l/s)	PE(hab.)	Q esgoto per capita (L/hab.d)	%CH ₄	Q biogás (Nm ³ /h)	Temp. amb (°C)
A	12.09.2015 a							
	22.02.2016	504	398,0	157.447	218	80,8	47,9	20,3
C	26.02.2015 a							
	12.01.2016	520	87,9	36.516	208	80,8	20,1	29,0
D	01.11.2015 a							
	31.12.2015	1270	85,2	84.612	87	70,0	53,6	23,7
	02.02.2016 a 28.03.2016							
F	11.12.2014 a							
	18.11.2015	575	433,6	195.817	191	79,5	137,1	22,7
J	01.12.2015 a							
	22.02.2016	398	74,0	23.145	276	78,2	11,6	27,7

Fonte Cabral (2016)

Cabral (2016) apresenta que o valor da relação unitária de metano/kg DQO removida obtida para cada ETE em função dos dados medidos e classifica-o conforme os valores previstos pelo método Lobato (2011) em situação típica, pior situação e abaixo da situação crítica, calculados através do programa de ProBio 1.0 Possetti (2015). O resultado da classificação é apresentado na Tabela 4.4. O Anexo D apresenta os valores unitários típicos considerados pelo método Lobato (2011).

Tabela 4.4 – Relação unitária e classificação das ETEs monitoradas

ETE	NL (Normal Litro) CH ₄ .(kgDQOremo) ⁻¹	Classificação	Sigla
F	142,4	Situação típica	ST
D	133,8	Situação típica	
C	114,5	Pior situação	
J	108	Pior situação	PS
A	80,8	Abaixo da pior situação	

Fonte: Cabral (2016)

Com base nos valores de vazão média de biogás e teor de metano encontrado durante o período de monitoramento de cada ETE, foi possível estimar a quantidade de energia elétrica a ser gerada e a potência da unidade de aproveitamento energético (motor Ciclo Otto). Para efeitos de comparação, foram estimados também os valores caso a estação realizasse medidas de vedação do reator, consertando os principais pontos de vazamento, para atingir a situação típica (situação atingida por duas das estações monitoradas e, portanto, considerada uma meta factível para as demais) Cabral (2016). A Tabela 4.5 apresenta os resultados dos cálculos supracitados.

Tabela 4.5 – Estimativa de geração de energia elétrica e da potência do motogerador para as ETEs monitoradas

ETE	Parâmetro	Situação atual	Situação típica	Diferença	Diferença (%)
A	Pot. Instalada (kWel)	134	302	168	125%
	Geração de En. Elétrica (kWh/d)	3216	7248	4032	
C	Pot. Instalada (kWel)	57	88	31	54%
	Geração de En. Elétrica (kWh/d)	1368	2112	744	
D	Pot. Instalada (kWel)	122	-	-	0%
	Geração de En. Elétrica (kWh/d)	3360	-	-	
F	Pot. Instalada (kWel)	397	-	-	0%
	Geração de En. Elétrica (kWh/d)	9525	-	-	
J	Pot. Instalada (kWel)	33	52	19	58%
	Geração de En. Elétrica (kWh/d)	792	1248	456	

Fonte: Cabral (2016)

Oberva-se que a ETE F é a única que tem potência acima de 200 KW, portanto com viabilidade econômica de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, considerando os dados de avaliação conforme valor este estimado em Rosenfeldt (2016); já a ETE A também pode ter viabilidade econômica se for adotado medidas de melhorias operacionais e melhorias do reator para reduzir perdas de metano e assim atingir a situação típica.

4.2.5 Melhorias recomendadas nos reatores UASB

Cabral (2016) destaca que a ETE F, a qual apresentou a situação típica conforme modelo Lobato (2011), passou por reformas e impermeabilização do reator, e principalmente pela detecção e conserto de vazamentos de biogás. Esse é um indicativo de que é possível para as demais estações realizarem melhorias físicas e operacionais nos reatores, a fim de minimizar as fugas de biogás para a atmosfera e também de maximizar a sua produção.

Além disso, segundo Cabral (2016) tem-se que a maioria dos reatores UASB no Brasil foi projetada quando ainda não se pensava no aproveitamento do biogás, e também que não foram levadas em consideração todas as suas particularidades operacionais; estima-se que estes apresentem características similares aos reatores monitorados no projeto de medição apresentado no item 4.2.4, com produção de biogás captado provavelmente próxima da pior situação.

A Figura 4.4 apresenta melhorias recomendadas a serem realizadas nos reatores UASB.



Figura 4.4 – Melhorias recomendadas para reatores UASB. Cabral (2016)
Fonte: Cabral (2016)

Para novos reatores que já considerem na fase de projeto a maximização da eficiência do reator e consequentemente da geração de gás, sua coleta e transporte eficientes, prevê-se que estes atinjam produção de biogás próxima da melhor situação.

Cabral (2016) salienta que mesmo para as estações de menor porte onde o aproveitamento energético do biogás pode não trazer viabilidade econômica, é importante realizar as melhorias com o objetivo de minimizar as perdas de biogás para atingir a situação típica, tendo em vista que estão sendo emitidas quantidades significativas de gás de efeito estufa (CH_4) e de gás odorante (H_2S) para a atmosfera, trazendo impactos ambientais, sociais e até econômicos.

O guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto Silveira et al. (2015) apresenta algumas das medidas para a otimização da produção e coleta do biogás em reatores UASB; tem-se também em Lobato (2011) os potenciais problemas em reatores UASB e possíveis soluções.

4.3 Digestores anaeróbicos de Lodo

4.3.1 Descrição geral

Segundo Jordão (2014), durante o tratamento do esgoto, o material comumente sedimentado com grande concentração de sólidos, denominado lodo, deverá ser submetido a tratamento, devido à elevada proporção de matéria orgânica instável. O lodo, nas concepções convencionais, é encaminhado para tanques especificamente projetados, os digestores, onde é decomposto anaerobicamente, caracterizando o processo de digestão anaeróbica.

Em Andreoli et al. (2014) tem-se que digestores anaeróbicos são reatores biológicos fechados construídos em concreto ou aço, onde o lodo bruto é misturado (e aquecido em países de clima temperado). O gás originário do processo de digestão é armazenado em gasômetros para processamento ou queima. A configuração dos digestores varia de acordo com a disponibilidade de área, a necessidade de manutenção de regime de mistura completa e a remoção de areia e espuma.

Tradicionalmente os digestores eram construídos em formato cilíndrico e fundo cônico, com diâmetro variando de 8 a 40m e inclinação de 1;3 no fundo. Segundo Andreoli et al. (2014) mais recentemente o formato ovalado tem se tornado o preferido por projetistas e operadores devido à facilidade no controle de espuma e

areia a partir de paredes laterais de elevada inclinação e à menor exigência com relação à densidade de mistura exigida, quando comparado com um digestor cilíndrico. Mesmo que o tipo de construção em forma ovoide tenha uma série de vantagens com relação à mistura, retenção de calor e captação de biogás, a construção em forma de cilindro é mais comum, por ter um custo de construção significativamente mais econômico. Silveira et al. (2015).

A Figura 4.5 apresenta fotos de digestores de lodo instalados na Alemanha e no Brasil.

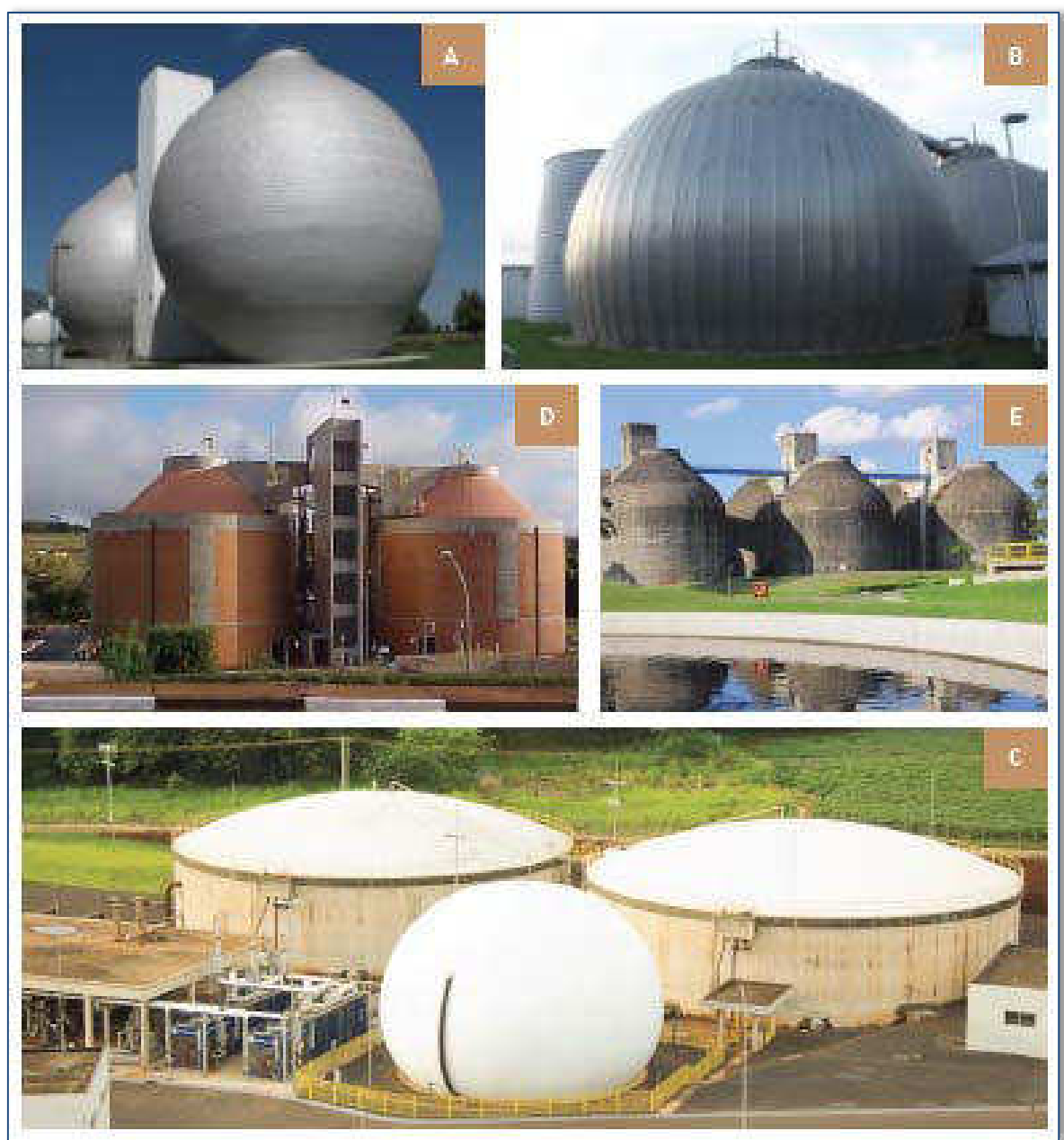


Figura 4.5 - Fotos de digestores de lodo: (a) forma oval na ETE Wassmansdorf - Alemanha; (b) ETE Neckarsulm – Alemanha; (c) Serviços Ambientais de Ribeirão Preto S/A (ETE Ribeirão Preto); (d) SABESP (ETE Franca); (e) SABESP (ETE Suzano).

Fonte: Silveira et al. (2015)

Tem-se em Silveira et al. (2015) que o digestor é alimentado de forma contínua, ou quase contínua, e o lodo é mantido no seu interior por um determinado período, chamado tempo de detenção; que segundo Andreoli et al. (2014) atualmente tem valor típico variando de 18 a 25 dias

A captação de biogás no digestor é consideravelmente mais simples do que em reatores UASB, sendo normalmente feita em um só ponto. A Figura 4.6 apresenta um exemplo de captação de biogás.



Figura 4.6 - Captação do biogás no topo do digestor. Fonte: Silveira et al. (2015)

Fonte: Silveira et al. (2015)

Conforme Silveira et al. (2015), devido à sua composição e suas propriedades, o biogás tem um grande potencial de perigo. Acidentes devidos à exposição do gás durante trabalhos em poços e canais e na manutenção de plantas de biogás podem ocasionar graves danos à saúde e, em casos extremos, até a morte.

Os perigos relacionados à manipulação do biogás são:

- asfixia por expulsão do ar ou por componentes gasosos com ação asfixiante, bem como riscos à saúde por determinados componentes do gás; e
- explosão pela formação de misturas gasosas explosivas.

Levando-se em consideração esses perigos, os equipamentos devem ser construídos, operados e monitorados conforme os princípios técnicos de segurança.

O guia técnico de aproveitamento energético do biogás em estações de tratamento de esgoto, Silveira et al. (2015) apresenta recomendações para condições de segurança e controle operacional.

4.3.2 Produção de Biogás em digestor anaeróbico de lodo

Conforme Andreoli et al. (2014) a produção de biogás no interior do digestor está diretamente associada à alimentação de lodo bruto. Em digestores alimentados em intervalos regulares ao longo do dia, a produção máxima ocorre normalmente 2 horas após cada alimentação; esta produção teórica é estimada em $0,8 \text{ m}^3/\text{kg}$ de sólidos orgânicos voláteis destruídos, o que caracteriza uma produção teórica de aproximadamente 25 l/hab.dia . O poder calorífico do biogás contendo 70% de metano é de aproximadamente 23.380 kJ/m^3 ($6,5 \text{ kW/m}^3$). A concentração de metano em volume no biogás varia de 60 a 70%; as Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam as características do biogás e também de outros gases para efeito de comparação.

Tem-se em Silveira et al. (2015) que a produção real observada depende de uma série de fatores, entre eles os fatores ambientais (vide capítulo 3), a constituição do lodo e o volume absoluto do digestor. A constituição do lodo a ser digerido, principalmente a fração de matéria orgânica biologicamente degradável, depende das substâncias que compõem os esgotos (por exemplo, fração de efluentes industriais), do tipo de processo de tratamento de esgoto, do volume de águas pluviais que é tratado juntamente na estação de tratamento e de variações anuais. Embora haja uma relação entre o volume do digestor, a vazão do lodo afluente e a carga de matéria orgânica, as condições de processo dependem, também, do tamanho absoluto do respectivo reator. A distribuição do volume total do reator em um ou mais digestores é uma variável preponderante. Muitas vezes, é possível obter melhores resultados em reatores maiores.

Quando for aproveitada unicamente a energia térmica do biogás, devem ser utilizados os mais baixos valores esperados para o dimensionamento da capacidade de armazenamento de biogás. Caso a instalação inclua motores a gás ou plantas de cogeração, a capacidade de armazenamento deve levar em conta os mais elevados valores esperados, mesmo que esses valores sejam esperados apenas em determinadas fases do ano (vários meses). Segundo Silveira et al. (2015) estações com taxas específicas de biogás acima de 25 L/(hab.d) só devem ser dimensionadas se os respectivos resultados tiverem sido medidos em um horizonte de vários anos de operação.

A Figura 4.7 apresenta um balanço típico de massa e energia em digestor anaeróbico

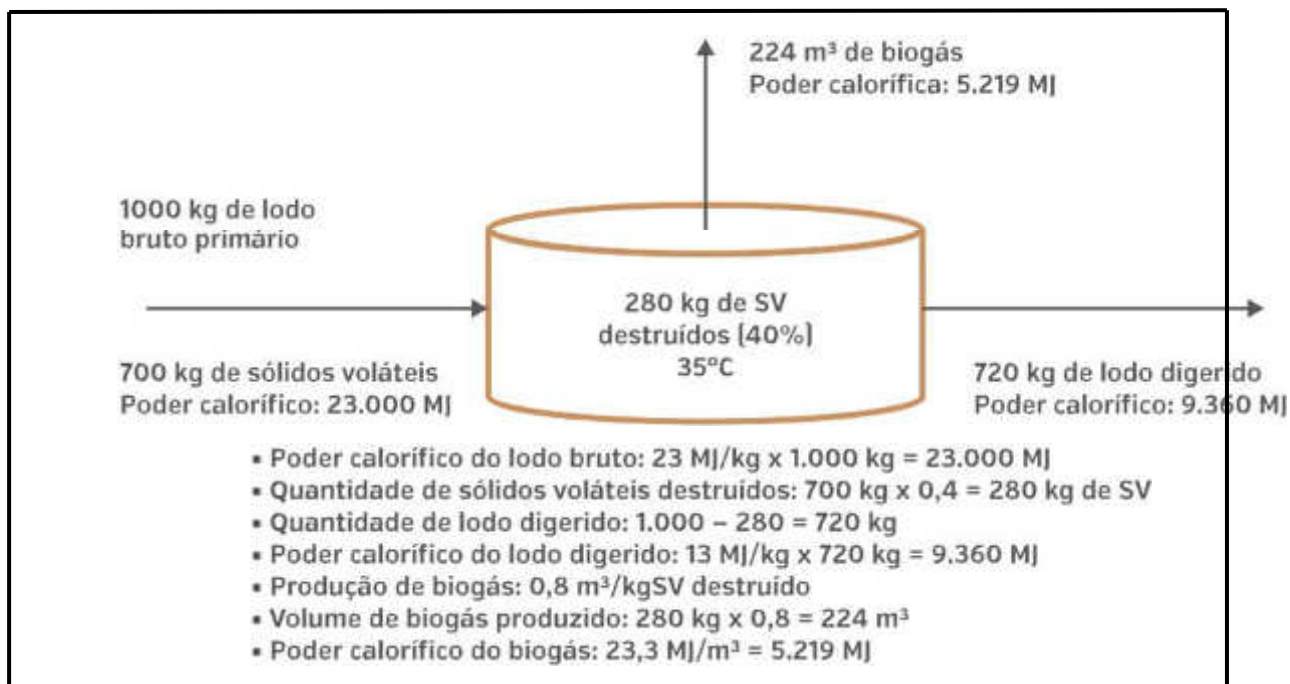


Figura 4.7 - Balanço de massa e energia em digestor anaeróbico.

Fonte: Silveira et al. (2015)

A partir dos balanços de DQO e energia apresentados anteriormente, podem ser estabelecidos indicadores de produção específica de energia, conforme mostrado na Tabela 4.6 (valores estabelecidos para uma ETE típica alemã, na qual o tratamento ocorre por meio de lodo ativado com idade de lodo de 16 dias e digestor anaeróbico para tratar o lodo primário e secundário).

Tabela 4.6 - Indicadores de produção de energia em digestores de lodo primário e secundário a partir da DQO aplicada.

ETAPA NO PROCESSO DE TRATAMENTO	CARGA ESPECÍFICA (g DQO/hab.d)	EQUIV. ENERGÉTICO (kWh/hab.d)	%	POTENCIAL ENERGÉTICO (kWh/hab.d)
DQO Esgoto Bruto	120	0,420	100	
DQO Decantador primário (1,5h)	40	0,140	33	0,245 (parcialmente acessível)
DQO Lodo de excesso (LA 16d)	30	0,105	25	
DQO oxidada com aeração ao CO ₂	40	0,140	33	0,175 (não utilizável)
DQO efluente final (inertes)	10	0,035	8	

Fonte: Silveira et al. (2015)

5. UTILIZAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS DE ETE

5.1 História

5.1.1 Projetos pioneiros

O aproveitamento energético do biogás de estações de tratamento de esgoto teve início em 1896 no Reino Unido com o aproveitamento para iluminação do “gás de esgoto”, e expandiu-se nas décadas seguintes tanto na Europa (principalmente Reino Unido e Alemanha) como nos Estados Unidos para aplicações de aquecimento, e de força motriz, incluindo a geração de eletricidade. No Brasil já em 1936, o Engº J. P. Jesus Netto foi o pioneiro a introduzir em 1934, na Instalação Experimental de Tratamento de Esgoto da Ponte Pequena, em São Paulo, um pequeno motor conjugado a um alternador de 6,5 KVA. Azevedo Netto, J. M. (1961), apud revista DAE nº 41, 1961. (vide Anexo C, com o artigo de J. P. Jesus Netto).

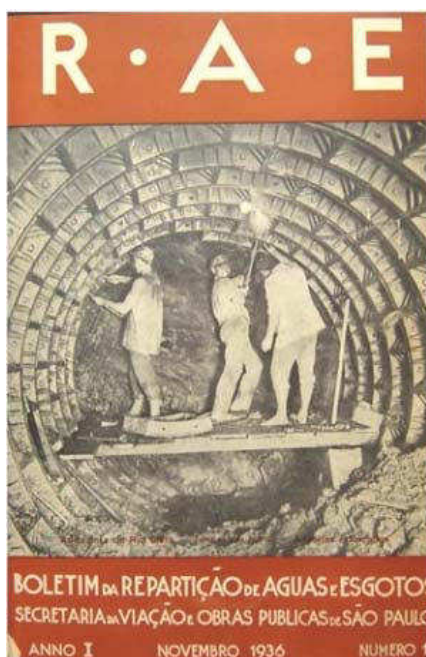


Figura 5.1 - Capa revista RAE nº 1 de 1936, com artigo do Engº J. P. Jesus Netto sobre aproveitamento do gás de esgoto.

Fonte: Revista RAE Nº 1 (1936)

A revista RAE nº 41 e nº 42, de 1961, apresenta a tese “Aproveitamento do Gás de Esgotos” do Professor José Martiniano de Azevedo Netto, (apresentada à Comissão Julgadora do concurso para provimento do cargo de Professor Catedrático de Tratamento de Águas de Abastecimento e Residuárias da Faculdade de Higiene e Saúde Pública da Universidade de São Paulo); esta tese descreve diversas possibilidades de uso para o biogás.

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam um extrato da tese.

10.1 MODALIDADES DE USO

Ao se considerarem os usos possíveis para o sub-produto que é o gás de esgotos, pode-se adotar a seguinte classificação conveniente:

1 - Usos primários

- 1.1 Produção de energia em motores fixos;
- 1.2 Acionamento de veículos;
- 1.3 Fornecimento de gás combustível para fins domésticos;
- 1.4 Aproveitamento em fornos industriais;
- 1.5 Utilização em processos industriais de síntese.

2 - Usos secundários

- 2.1 Aquecimento dos digestores;
- 2.2 Secagem de lodos;
- 2.3 Incineração de resíduos;
- 2.4 Calefação dos edifícios;
- 2.5 Serviços de laboratório e cozinha;
- 2.6 Iluminação.

3 - Usos especiais

- 3.1 Agitação nos digestores;
- 3.2 Empregos militares.

4 – Descarte

- 4.1 Lançamento na atmosfera;
- 4.2 Queima.

Figura 5.2 – 10.1 - Modalidades de uso do gás de esgoto

Fonte: Azevedo Netto (1961), Apud revista DAE, nº 42, 1961.

Observa-se na Figura 5.2, no item “4- Descarte”, que o lançamento do biogás na atmosfera é uma opção, o que mostra que naquela época, 1961, certamente por desconhecimento, não havia a preocupação com aspectos ambientais sobre lançar metano na atmosfera, que é um gás que contribui para o efeito estufa ao destruir a camada de ozônio, levando ao aquecimento global; Jordão (2014) comenta que somente na última revisão da Norma Brasileira de 2009 é previsto que se o biogás não for aproveitado, seja queimado, enquanto que na versão anterior de 1975 nada é comentado sobre o tema.

Nota-se também na tese que no item 12.1 - Estudo econômico / considerações preliminares, já se considerava que ao aproveitamento econômico do biogás deveria *“entrar obrigatoriamente na economia das modernas estações de tratamento de esgoto”*. Observa-se que é apresentada o entendimento equivocado de que *“a produção de energia própria não traz benefícios para a operação ou para os resultados das estações de tratamento de esgoto”*.

12 – ESTUDO ECONÔMICO: SOLUÇÃO PARA SÃO PAULO

12.1 – CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Em 1943 Jesus Netto assim apreciava a questão do aproveitamento do gás:

“Uma instalação de tratamento de esgotos não é uma indústria da qual se pretende auferir lucros imaginários: é uma obra de higiene e saneamento, e como tal deve ser orientada na sua construção. Não quer isto dizer, entretanto, que se despreze o valor intrínseco de certos subprodutos do tratamento. O seu aproveitamento entra obrigatoriamente na economia das modernas estações de tratamento de esgotos” (29).

Em vista das múltiplas possibilidades de aproveitamento do gás, deve-se fazer, para cada caso, um estudo comparativo técnico e econômico, no qual deverão ser consideradas as condições locais, o custo dos equipamentos e o valor das utilidades.

A respeito da instalação de motores a gás para a produção de energia elétrica encontra-se a seguinte observação feita pelo Eng. Wittner (55):

“Deve-se assinalar que a única justificativa para a aplicação de capital em instalações destinadas à produção de força em substituição ao fornecimento de energia externa, baseia-se na economia real a ser obtida. As considerações a favor ou contra instalações dessa natureza devem ser feitas em bases financeiras, uma vez que a produção de energia própria não traz benefícios para a operação ou para os resultados das estações de tratamento de esgotos”.

Figura 5.3 - 12 - Estudo Econômico

Fonte: Azevedo Netto (1961), Apud revista RAE, nº 42, 1961.

Atualmente, o entendimento conforme Silveira et al. (2015), é que *“o aproveitamento energético do biogás nos processos de tratamento dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos, consagrado em diversos países, representa um pequeno esforço de modernização das instalações dos sistemas brasileiros com impactos altamente positivos na sustentabilidade econômico-financeira, na qualidade dos processos de tratamento e na melhoria do meio ambiente, contribuindo de forma efetiva para a redução dos gases de efeito estufa”*, indicando uma evolução do papel do uso sustentável do biogás em relação ao conceito do passado baseado somente em aspectos financeiros.

Não se pretende aqui relatar todas as iniciativas históricas que houveram no Brasil sobre aproveitamento do biogás de ETE, mas apenas indicar outros projetos em São Paulo que relaciona dificuldades técnicas e econômicas existentes a época do projeto.

- **1982 a 1991:** Programa de gás de metano para uso veicular - parceria entre a Sabesp/SP e o IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas/SP- Zuffo (2016)b.

Em 1982 foi inaugurada a primeira usina de beneficiamento de biogás da ETE da Vila Leopoldina/SP e em 1988 a usina da ETE de Pinheiros/SP. O programa foi extinto em 1991, devido a dificuldades técnicas / operacionais

- a) Tecnologia de conversão dos veículos ainda precária e autonomia baixa dos veículos;
- b) A Sabesp usou em sua frota, mas a logística de abastecimento da frota era deficitária;
- c) Manutenção era um complicador pela carência de operadores capacitados;
- d) Grau de purificação do biogás e danos aos motores não totalmente conhecidos;

- **2006:** Geração de energia elétrica a partir de biogás de ETE

O projeto Energ-Biog foi o resultado do convênio entre o CENBIO/IEE/USP- Universidade de São Paulo e a Sabesp/SP para o estudo comparativo entre as soluções de geração de energia elétrica com microturbina e com MCI - motor de combustão interna do ciclo Otto, ambos com 30 KW. Fonte: Coelho (2006).



Figura 5.4 - Microturbina do projeto Energ-Biog – 2006.
Fonte: Coelho et al, (2006)

O estudo de caso do projeto acima Energ-biog, apresentado em Costa (2006), informa que o projeto teve muitas dificuldades técnicas para a implantação, notadamente por utilizar equipamentos importados e haver falta de conhecimento / suporte local dos fornecedores de equipamentos. As barreiras comentadas na tese acima para o uso do biogás estão incluídas no conjunto de barreiras apresentadas no item 6 desta monografia, o que demonstra que passados 10 anos, não houve praticamente mudança na percepção do setor do saneamento quanto ao aproveitamento do biogás de ETE.

5.1.2 Barreiras e Riscos

Os projetos pioneiros foram muito importantes para mostrar que é possível fazer o aproveitamento do biogás, e que esforços devem ser concentrados no sentido de tornar viável o aproveitamento desta fonte de energia.

Os projetos atuais em operação e desenvolvimento são agora fundamentais para que esta barreira tecnológica e econômica possa ser mitigada, ao ser divulgado as experiências reais na implantação e operação dos empreendimentos. Evidentemente há o risco de que se os projetos atuais não tiverem sucesso, esta barreira será mantida, e poderá contribuir fortemente contra a implementação de outros projetos.

5.2 Alternativas para a utilização do biogás

5.2.1 Formas Principais de aproveitamento do biogás

Atualmente não é mais aceitável simplesmente descartar o biogás para a atmosfera devido a ser um gás indutor do efeito estufa; então o biogás é queimado em queimadores (“Flares”) conforme mostra a Figura 5.5, (*Flares* são normalmente do tipo aberto, muitas vezes com queima ineficiente devido á condições ambientais) como ocorre na maioria das ETEs no Brasil, ou então em poucas ETEs é aproveitado energeticamente.



Figura 5.5. Queima do Biogás em “Flare”.
Fonte: Possetti, 2016

Segundo o Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás de Estação de Tratamento de Esgoto Silveira et al. (2015), é provável que a principal forma de aproveitamento do biogás seja a secagem de lodo (uso térmico – baixa exigência de purificação) ou a geração conjunta de energia elétrica no sistema de cogeração - CHP (exigência mais elevada na purificação), com a opção de aproveitamento de uma parcela de energia térmica.

A Figura 5.6 apresenta as formas principais de aproveitamento energético do biogás. Não é apresentado a aplicação de células combustíveis, uma vez que esta forma de uso é muito rara e com baixa possibilidade de ser aplicado no Brasil a curto prazo devido á custos e dificuldades para a operação e manutenção.

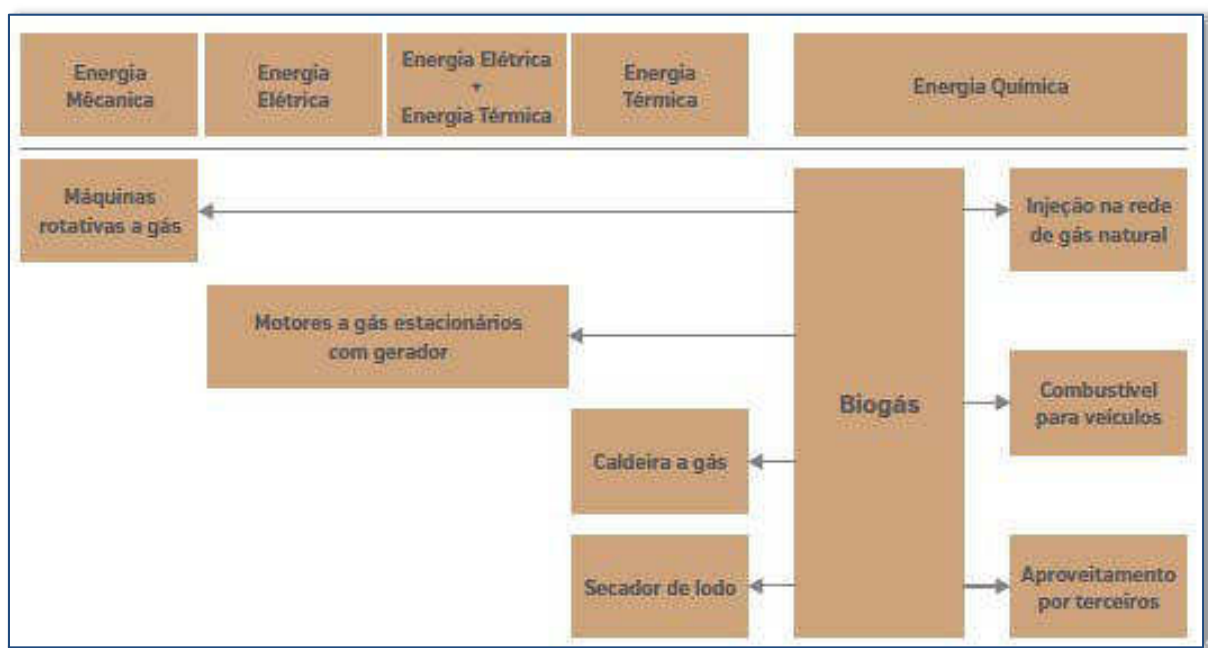


Figura 5.6 Formas principais de aproveitamento energético do biogás.

Fonte: Silveira et al. (2015)

A decisão sobre qual a melhor forma de uso a utilizar deve ser feita caso a caso, levando-se em conta os aspectos econômicos e ambientais, fazendo-se um projeto energético específico para cada local.

5.2.2 Geração de energia elétrica, térmica e Uso veicular

Apresenta-se abaixo os principais usos de biogás de ETE.

5.2.2.1 Geração de energia elétrica

A geração de energia elétrica pode atender parcial, ou em algumas ETEs totalmente, as necessidades energéticas da estação de tratamento; eventualmente, se a energia gerada for superior à consumida na ETE, é possível ser exportada para a concessionária local de energia elétrica, seguindo os mecanismos previstos resolução 482 / 687 da ANELL que viabilizam a compensação de energia excedente gerada por outras unidades; utiliza-se geralmente motores de combustão interna com gerador , por ser mais econômico, ter maior rede de suporte técnico e obio gás necessitar de menor tratamento; outras opções são microturbinas e turbinas, O sistema pode ser dimensionado para atender o horário de ponta, onde a energia elétrica é mais cara.

A Figura 5.7 apresenta o esquema básico para a geração de energia elétrica.

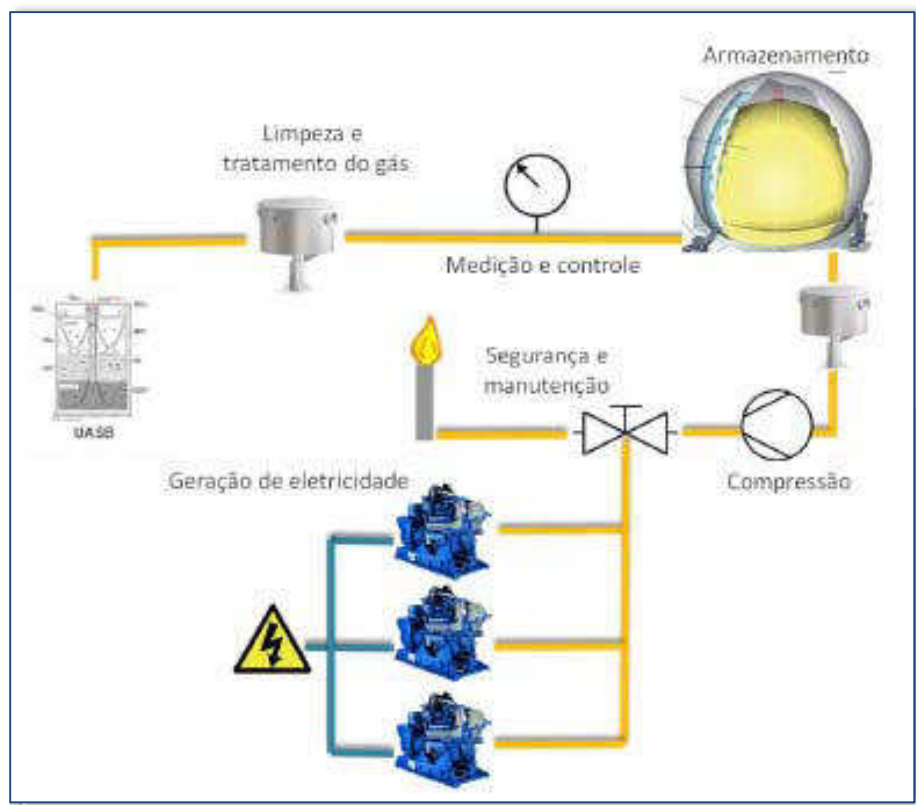


Figura 5.7 – Geração de energia elétrica com armazenamento de biogás.

Fonte: Valente (2015)

A Tabela 5.1 apresenta as características das principais alternativas para se gerar energia elétrica, que são: motores de combustão interna – MCI; Microturbinas e Turbinas.

Tabela 5.1 – Parâmetros – Motores de combustão interna – MCI, Turbinas e Microturbinas.

	Principais alternativas		
	Combustão interna	Turbinas	Microturbinas
Faixa de potência disponível no mercado (kW)	5 – 5.000	500 – 250.000	30 - 1000
Faixa usual de aplicação (kW)	800 - 3000	> 3.000	<1.000
Custo de implantação (US\$.kW ⁻¹)	900 - 1000	1000 - 1800	4000 - 5000
Custos de O&M (US\$.kWh ⁻¹)	0,009 - 0,010	0,006 - 0,010	0,15 - 0,20
Taxa de geração de eletricidade e calor (kWh consumido por kWh gerado)	2,8 - 3,0	3,7 - 4,6	4,1 - 4,7
Eficiência elétrica (%)	33 - 36	22 - 27	22 - 33
Consumo de combustível (kWh.h ⁻¹ por kW instalado)	2,8 - 3,0	3,7 - 4,6	3,3 - 7,5
Pressão de alimentação do gás (atm)	< 0,2 - 3,0	6,5 - 11	3,7 - 5,8
Produção de gás de exaustão (kg.h ⁻¹)	6 - 7	15 - 20	23 - 37
Temperatura do gás de exaustão (C)	360 - 470	510	280 - 310
Recuperação total de calor (kWh por kW instalado)	1,10 - 1,28	1,56 - 2,08	3,2 - 3,6
Eficiência total de geração de eletricidade e calor (%)	75 - 76	68 - 69	60 - 73
Emissões de NOx (ppm)	250-3000	35-50	<9

Fonte: Lobato (2011)

5.2.2.2 Geração de energia térmica

A geração de energia térmica, a exemplo do indicado na Figura 5.8, serve neste caso como fonte usual de aquecimento dos digestores e secagem de lodo, utilizando-se de caldeiras e secadores. O sistema de tratamento é mais simples que o utilizado em motores de combustão, microturbinas e turbinas. A Tabela 5.2 apresenta as vantagens e desvantagens do uso em caldeiras e secadores térmicos.

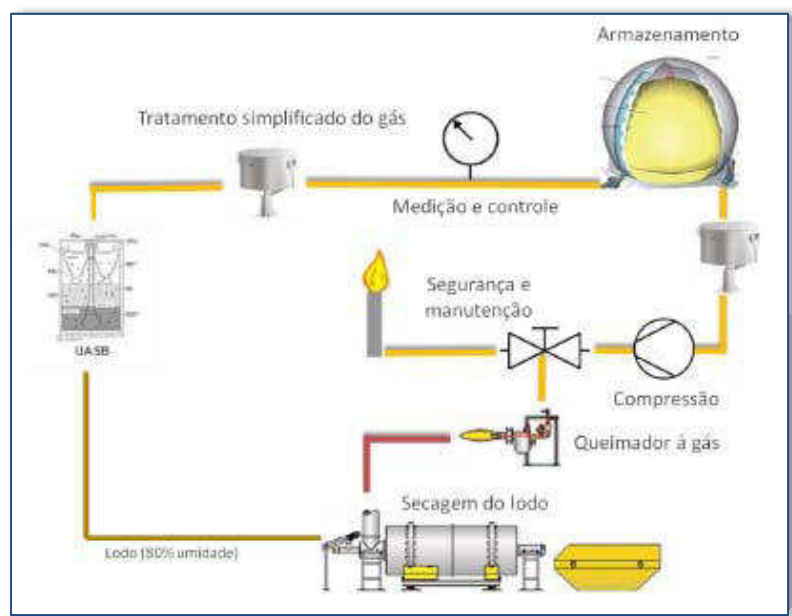


Figura 5.8 – Geração térmica, com tratamento simplificado
Fonte: Valente (2015)

Tabela 5.2 – Uso de biogás em Caldeiras e Secadores – Vantagens e Desvantagens.

Tipo de uso	Vantagens	Desvantagens
Uso em caldeiras	• Prática conhecida e com histórico de sucesso nos EUA há mais de 25 anos. • Aplicável a diferentes portes de caldeiras. Experiência nos EUA reporta aplicações que variam de 2 kJ.h⁻¹ a 160.000 MJ.h⁻¹. • Modificações das caldeiras para operar com biogás, em combinação ou em substituição ao gás natural, restringem-se ao sistema de alimentação e de queima de gases. O acréscimo de vazão, decorrente da utilização do biogás como combustível, não afeta negativamente a operação da caldeira.	• Necessidade de modificação do sistema de alimentação e de queima de combustível da caldeira, de modo a possibilitar o processamento de uma maior vazão de gás e a garantir um valor calorífico equivalente ao do gás natural. • Possibilidade de formação de depósitos e incrustações nas tubulações da caldeira devido à presença de siloxanos (biogás for originário de aterros sanitários). Todavia, limpezas anuais são usualmente suficientes para se evitar problemas operacionais. • A caldeira necessita estar localizada próxima da fonte de geração de biogás, já que os custos de transporte do biogás a longas distâncias são elevados.
Uso em secadores térmicos	• A utilização do biogás pode promover uma considerável redução nos custos operacionais. • Higienização do lodo de esgoto possibilitando o uso agrícola.	• Consumo de combustível é o principal componente operacional. • Liberação de gases para a atmosfera. • Risco de liberação de odores.

Fonte: Lobato (2011)

5.2.2.3 Geração conjunta de energia elétrica e de energia térmica,

Na cogeração (CHP – Combined Heat and Power); utiliza-se usualmente: motores a gás do ciclo Otto ou ciclo Diesel; turbinas ou microturbinas. A Figura 5.9 apresenta a central de cogeração da ETE Arrudas da COPASA – Belo Horizonte – MG, em operação desde 2011 com 12 x microturbinas de 200 KW, totalizando 2,4MW instalado, em um processo de cogeração. Informações adicionais da ETE Arrudas são apresentadas no item 5.4.1.

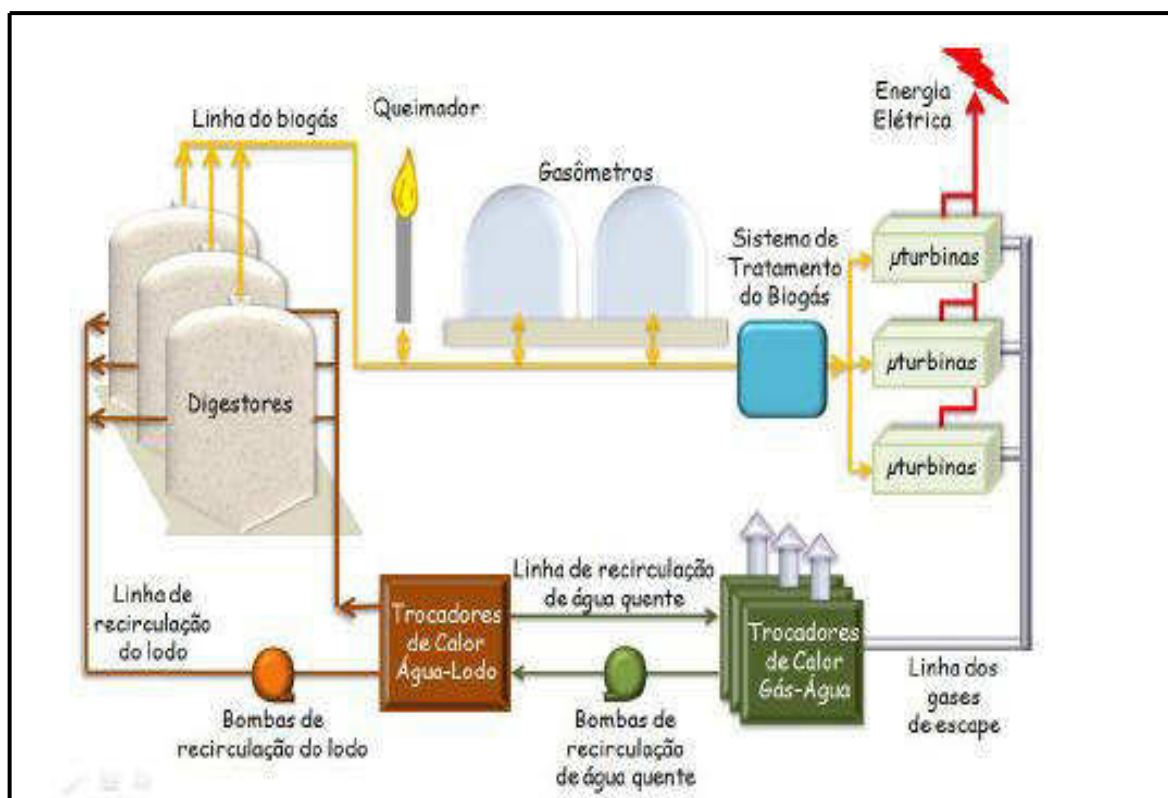


Figura 5.9 — Central de Cogeração da ETE Arrudas - MG – Biogás de Digestor de Lodo

Fonte: Gaio (2013)

A Tabela 5.1 – Parâmetros e a Tabela 5.3: Vantagens e Desvantagens, apresentam informações sobre MCI, microturbinas e Turbinas. Informações adicionais podem ser obtidas em Lobato (2011), Silveira et al. (2015), Wiser (2012) e Coelho (2006).

Tabela 5.3 – Uso de biogás em MCI, Turbinas e Microturbinas -- Vantagens e Desvantagens

Alternativa	Vantagens	Desvantagens
Motores de combustão interna	• Custo de aquisição moderado. • Tecnologia madura e largamente aplicada para a geração de energia a partir do biogás, especialmente em instalações com potência a partir de 800 kW. Nos EUA, cerca de 60% dos projetos de geração combinada de eletricidade e calor, a partir de biogás de aterros sanitários, utilizam motores de combustão interna (dados de 2003). • Grande diversidade de motores estacionários disponíveis no mercado, cobrindo uma grande faixa das aplicações (5 kW até 5MW) e ciclos de operação • Apresenta partida rápida, operação estável e são usualmente bastante confiáveis. • Normalmente operados com gás natural, mas podem ser ajustados para operar com propano ou biogás. • Grande potencial de recuperação de energia (elétrica + térmica).	• Mais sujeitos à corrosão, embora a utilização de óleos lubrificantes possibilite alguma proteção contra os produtos ácidos da combustão.
Turbinas a gás	• Menos sujeitas à corrosão que os motores de combustão interna. • A elevada temperatura dos gases de exaustão possibilita a geração de vapor à alta pressão e elevada temperatura 480°C, ou a aplicação direta em processos industriais de aquecimento e de secagem. • Em um ciclo combinado de turbina a gás e a vapor, os gases de exaustão proveniente da turbina a gás alimentam uma caldeira que fornece vapor para o funcionamento da turbina a vapor, dessa forma existem duas fontes de energia elétrica, sendo a eficiência da ordem de 60-70%.	• Elevado custo de aquisição, em função da necessidade de compressão elevada do gás. • Elevado custo operacional, em função da necessidade de compressão elevada do gás. • Demanda de gás com qualidade consistente. • Demanda de elevada pressão de gás na entrada.
Microturbinas	• Apresentam vantagens em relação às outras alternativas de geração de energia a partir do biogás nos seguintes casos: baixa produção de biogás; biogás com baixo teor de metano; preocupação com emissão de NOx; quando da utilização da eletricidade no próprio local de geração, em substituição à energia comprada da concessionária; quando o suprimento de eletricidade é não confiável e de preço elevado; quando houver necessidade de água quente no próprio local ou nas imediações. • Equipamentos portáteis e fáceis de serem modulados (uma ou múltiplas turbinas) para se adequar à produção de biogás e às necessidades locais. • Equipamentos compactos e com poucas partes móveis, requerendo dessa forma poucos cuidados com a operação e a manutenção. • Baixas emissões de NOx, usualmente dez vezes inferiores às dos motores de combustão interna de melhor desempenho, e também inferiores às emitidas por queimadores (flares). • Capazes de operar com biogás de baixo conteúdo de metano (35 ou até mesmo 30%). • Configuração padrão do equipamento usualmente oferece um gerador de água quente (~ 95°C) a partir do calor desprendido no exaustor.	• Eficiência inferior a motores de combustão interna e outros tipos de turbinas. Consomem cerca de 35% a mais de combustível por kWh gerado. • Suscetível à contaminação por siloxano. Alimentação com biogás de aterro usualmente requer nível mais elevado de pré-tratamento que o requerido por turbinas convencionais e outras formas de geração de energia elétrica. • Atualmente, poucos compressores de baixa vazão e elevada pressão encontram-se disponíveis para atender os requisitos das microturbinas sem a necessidade de adaptações caras. • Poucas informações disponíveis sobre a confiabilidade de longo termo e sobre os custos de operação e manutenção de microturbinas a biogás.

Fonte: Lobato (2011)

5.2.2.4 Uso veicular:

Segundo Silveira et. al. (2015), o uso de biogás como combustível de veículos demanda sua purificação até o biometano. Além da remoção do sulfeto de hidrogênio (H_2S) e umidade deve ser removido o dióxido de carbono (CO_2), o que aumenta significativamente os custos de investimento e operação.

É possível utilizar o biometano em motores a gasolina ciclo Otto que, em parte, já vêm de fábrica convertidos para o uso com gás natural, como também em motores a gás ciclo Diesel.

Conforme Zuffo (2016)^b a ETE de Franca – SP está implantando o aproveitamento do biogás para uso veicular, com previsão para estar operacional em 2017. O aproveitamento será em frota própria (43 veículos) correspondente a somente 15% da produção diária e o excedente será aproveitado em ônibus da frota da prefeitura municipal, após acordo de parceria.



Figura 5.10 – ETE Franca e uso veicular do biogás.

Fonte: Moreira (2016)

Reitera-se que, conforme apresentado no item 3.4, a resolução da ANP nº 8 de 2015 não permite o uso do biogás de resíduos sólidos urbanos e de esgoto sanitário para ser inserido na rede distribuição de gás natural ou disponibilizados nos postos de distribuição, o que leva que o biometano para uso veicular oriundo de ETEs somente possa ser utilizado em frotas específicas, à exemplo do caso Franca acima comentado. O maior empecilho, para que a ANP tenha restrições com o biogás de aterro e esgoto sanitário, é haver preocupações com os Siloxanos segundo Coelho, S. T. (2016).

O item 3.4 apresenta informações adicionais sobre Siloxanos e tratamento necessários para uso veicular do biogás.

5.3 Aproveitamento do biogás: Europa e Estados Unidos

A crescente preocupação mundial nas últimas décadas com o aquecimento global e com a sustentabilidade, tem levado os países a se comprometerem em acordos internacionais realizados no âmbito das nações Unidas, como a conferência de Paris COP 21 realizada em 2015, a adotarem uma matriz energética mais limpa, com a redução de utilização de combustíveis fósseis e com o aumento da utilização de energias renováveis, tais como energia solar, eólica, biocombustíveis, etc.

Entre os biocombustíveis, o biogás oriundo de matéria orgânica sujeita à processos anaeróbicos que ocorrem em tratamento de esgoto, aterros sanitários, resíduos da indústria de alimentos e indústria agro-pecuária, tem tido uma utilização crescente; espera-se que continue crescendo conforme aumenta a assimilação da tecnologia e a viabilidade técnica e econômica desta fonte de energia.

Apresenta-se a seguir uma visão geral da utilização do biogás em:

a) Países membros do IEA Bioenergy Task 37; b) Estados Unidos e c) Brasil

a) Países membros do IEA Bioenergy Task 37

Observa-se no Gráfico 5.1 que o número de plantas de biogás em operação nos países membros do IEA Bioenergy Task 37 Svenson et al. (2016), onde destaca-se a Alemanha com 10.065 plantas, sendo 1400 plantas de tratamento de esgoto; o Brasil apresenta 127 plantas de biogás, sendo somente 7 com tratamento de esgoto.

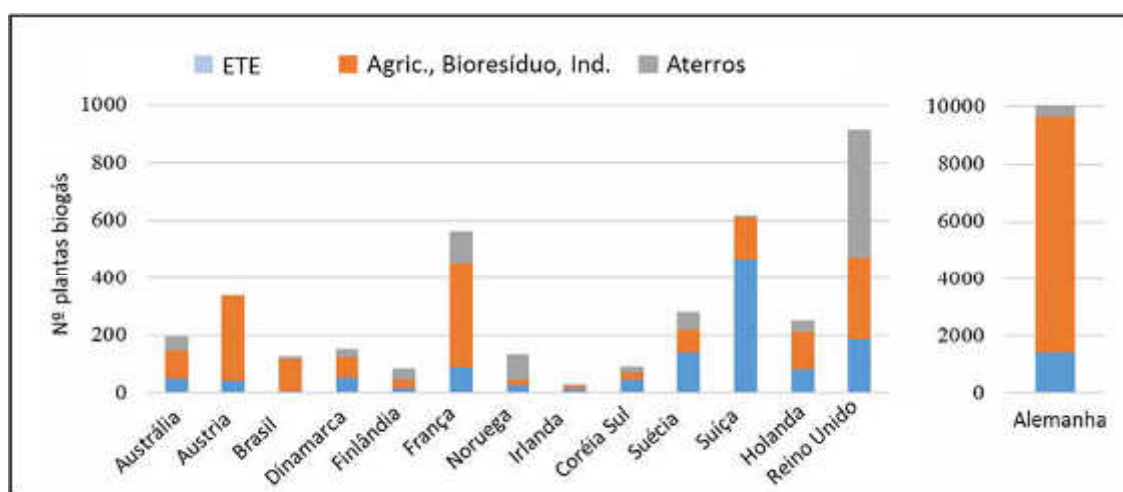


Gráfico 5.1 – Quantidade de Plantas de biogás – Países membros do IEA Bioenergy Task 37
Fonte: Svenson et al. (2016)

A Tabela 5.4 mostra para a Alemanha a quantidade de plantas e a produção de energia por tipo de substrato / planta em 2015.

Tabela 5.4 – Quantidade de plantas de biogás na Alemanha em 2015.

Substrato/ Tipo Planta	Quantidade de plantas	Produção energia (GWh/ano)	
		Eletricidade bruta	Calor bruto
Lodo de esgoto	1,400	1,390	1,979
Resíduos	180	903.3	479.4
Agricultura	8,005	28,002.3	14,861.4
Industrial	80	1,204.4	639.2
Aterro sanitário	400	390	110
Total	10,065	31,890	18,069

Fonte: Svenson et al. (2016)

Conforme mostra o Gráfico 5.2, a produção anual de biogás na Alemanha é cerca de 80 TWh, 22 TWh no Reino Unido, 8,5 TWh no Brasil, 5,5 THh na França e 4 TWh na Holanda. Os demais países mostram taxa de produção na faixa de 0,5 a 2 TWh. Em países como Reino Unido, Brasil e Coréia do Sul, a maior fonte de produção de biogás são os aterros sanitários, enquanto que em países como Alemanha, Suíça e Dinamarca os aterros sanitários apresenta pouca contribuição para a produção de biogás, indicando o grau em que material orgânico é levado para aterros.

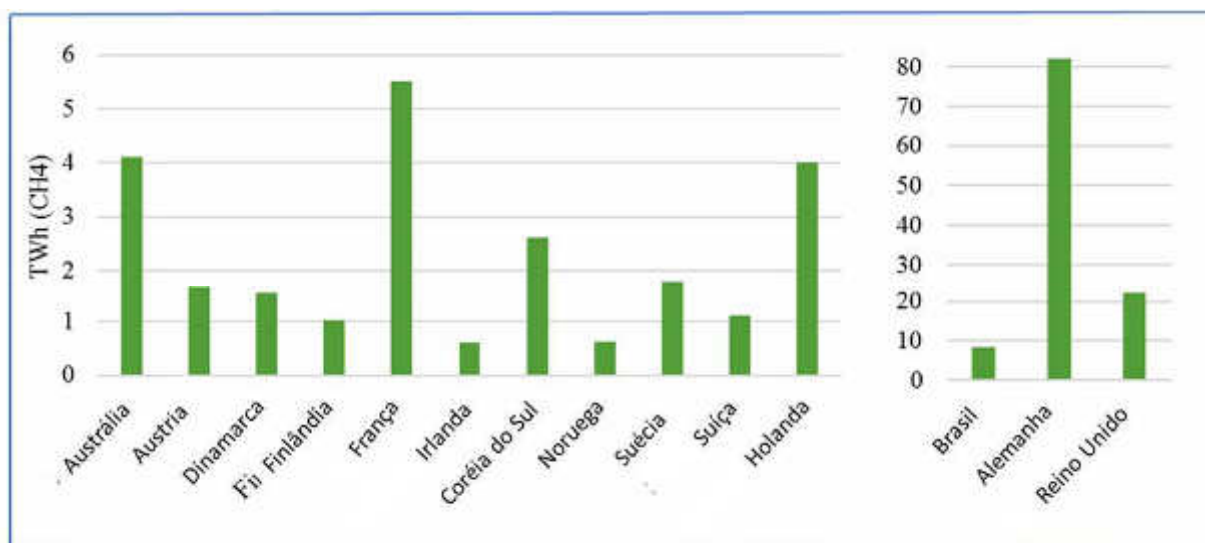


Gráfico 5.2 – Produção anual de biogás nos países membros do IEA Bioenergy Task 37.

Fonte: Svenson et al. (2016)

Conforme Svenson et al. (2016) o biogás produzido é principalmente utilizado na geração de calor e eletricidade na maioria dos países, com exceção da Suécia onde aproximadamente metade do biogás produzido é utilizado em veículos. A Alemanha não fica atrás em números absolutos (530 GWh). Outros países como a França, Dinamarca e Coreia do Sul, tem mercados emergentes para o biometano como combustível para transporte automotivo.

b) Estados Unidos - EUA

Nos Estados Unidos levantamento apresentado em Serfass (2011) mostra que há em operação cerca de 984 plantas de biogás com aproveitamento energético, sendo 171 (agro-pecuária / indústria), 250 em tratamento de esgoto e 563 em aterros sanitários, apesar de haver cerca de 11.000 locais com possibilidades de desenvolvimento para utilização do biogás, demonstrando que ainda é muito baixo o aproveitamento desta fonte de energia nos EUA.

Já referindo exclusivamente à tratamento de esgoto, o relatório EPA (2011), *“Environmental Protection Agency - Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities - Market Analysis and Lessons from the Field”*, mostra que em 2008 havia 3171 estações municipais de tratamento de esgoto, sendo que destas 1455 apresentavam tratamento anaeróbico.

O Gráfico 5.3 apresenta que em 2011 havia 104 plantas de biogás aproveitando o biogás em cogeração (CHP), 257 plantas com viabilidade econômica para implantar a cogeração (destes 203 já aproveitavam o biogás para aquecimento), e 1094 sem viabilidade econômica, nas premissas adotadas no relatório.

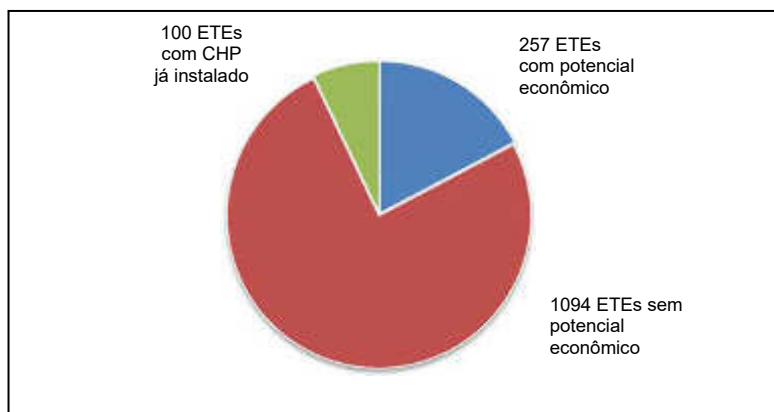


Gráfico 5.3 – Quantidade de ETEs nos EUA com potencial econômico para planta de biogás

Fonte: EPA (2011)

A Tabela 5.5 apresenta os tipos de tecnologias empregadas nas 104 estações de tratamento de esgoto dos EUA que aproveitam o biogás com CHP.

Tabela 5.5 – Quantidade de plantas e potência por tipo de tecnologia CHP.

Equipamento	Numero de ETEs	Capacidade (MW)
Motor combustão interna	54	85.8
Microturbina	29	5.2
Célula combustível	13	7.9
Turbina a gás	5	39.9
Turbina a vapor	1	23.0
Ciclo combinado	1	28.0
Total	104	189.8

Fonte: EPA (2011)

Os dados acima mostram que é pequeno o aproveitamento do biogás nos EUA; objetivando incentivar o uso desta fonte de energia, as agências *WERF - Water Environment Research Foundation* e *NYSERDA - New York State Energy Research and Development Authority* conduziram uma pesquisa em 2012 para:

- Identificar as barreiras que as plantas públicas encontram para implementar o uso energético do biogás;
- Providenciar estratégias específicas para superar as barreiras, e
- Providenciar recomendações para expandir a produção de energia renovável oriunda do biogás.

O resultado desta pesquisa é apresentado no relatório Willis (2012) e é comentado no item 6.2.5 – pagina 92 desta monografia, salientando que as principais barreiras são a viabilidade econômica, maturidade da tecnologia e cultura das empresas públicas de saneamento, ou seja, basicamente as mesmas barreiras existentes no Brasil.

5.4 Aproveitamento do biogás de ETE no Brasil

5.4.1 Plantas em operação: aproveitamento atual ou fase de implantação

No Brasil o aproveitamento do biogás nos diversos setores ainda é incipiente, havendo em 2015 cerca de 127 plantas de biogás em operação, sendo que destas somente 7 são de estações de tratamento de esgoto (Sewage sludge). A Tabela 5.6 indica a quantidade de plantas no Brasil; já o site <<https://cibiogas.org/biogasmap>> apresenta dados e localização de plantas de biogás.

Tabela 5.6 – Quantidade de plantas de biogás no Brasil em 2015-

Tipo planta	Quantidade de plantas	Produção de energia (GWh/year)	%
Lodo de esgoto	7	199	5.2
Resíduos organ.	8	32	0.8
Agricultura	60	1,096	28.6
Industrial	43	860	22.4
Aterro	9	1,648	43.0
Total	127	3,835	

Fonte: Svenson et al. (2016)

A Figura 5.11 apresenta 11 plantas com aproveitamento do biogás, sendo que 7 plantas já fazem o uso energético do biogás (Ouro Verde/PR; Ribeirão Preto/SP; Arrudas/MG; Vieira/MG; Betim/MG; Barueri/SP; Jacuípel II/BA) e outras 4 plantas que estão em processo de implantação de planta de biogás (Rio Preto/SP; Franca/SP; Ibitiré/MG; Belém/PR).

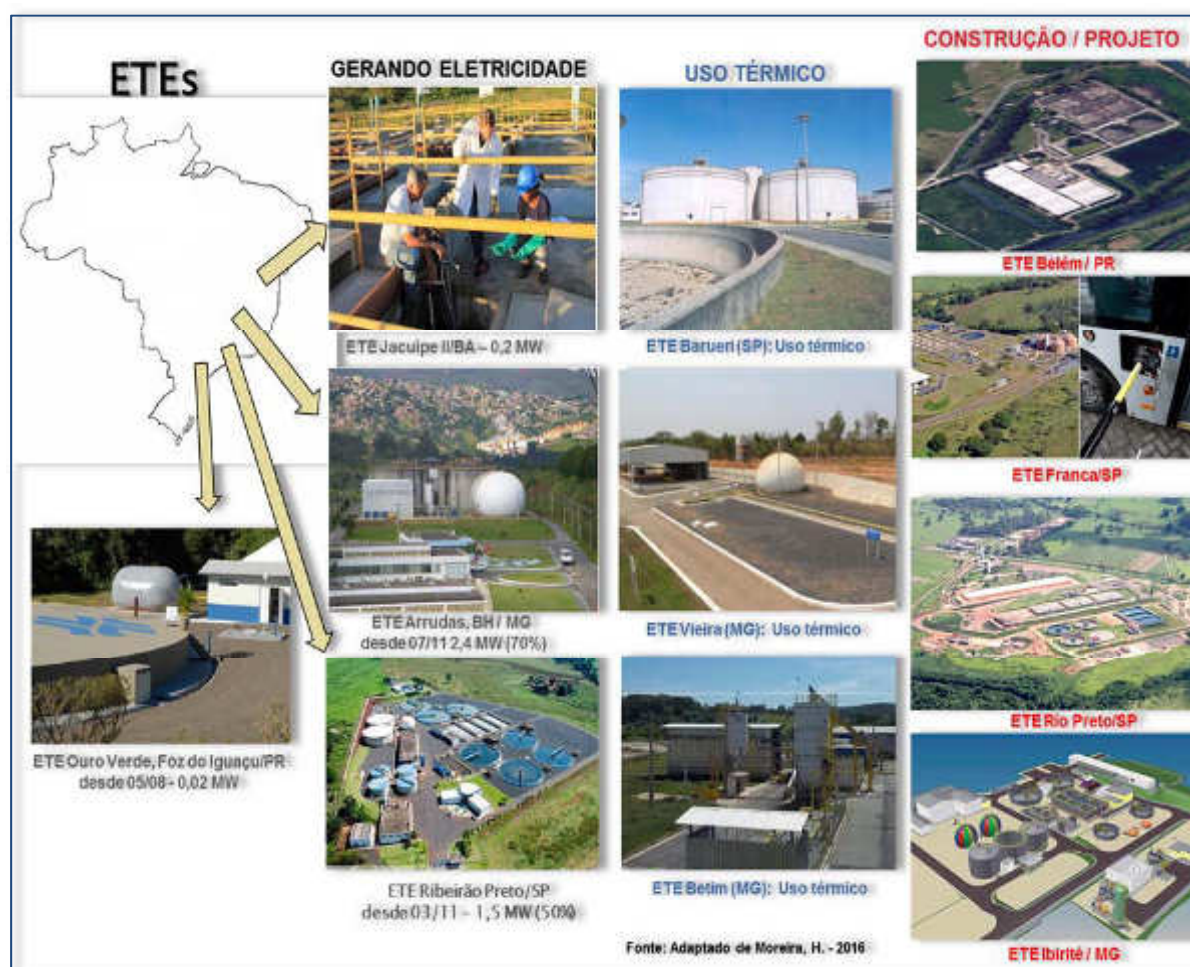


Figura 5.11 – ETEs com aproveitamento de biogás no Brasil.
Fonte: Adaptado de Moreira (2016)

Entre as quatro que já geram eletricidade (Ouro Verde, Ribeirão Preto, Arrudas e Jacuípe II), a ETE Ouro Verde, em Foz do Iguaçu/PR, foi a primeira ETE da atualidade a possuir um sistema de geração a partir do biogás. Esta utiliza o biogás de reatores anaeróbios de esgotos. Sua capacidade instalada, é de apenas 20 kW. Segundo Gomes (2016) atualmente a mesma está em processo de adequação para integrar-se ao Sistema Interligado Nacional (SIN) como micro geradora de energia, por meio da Resolução 482 da ANEEL.

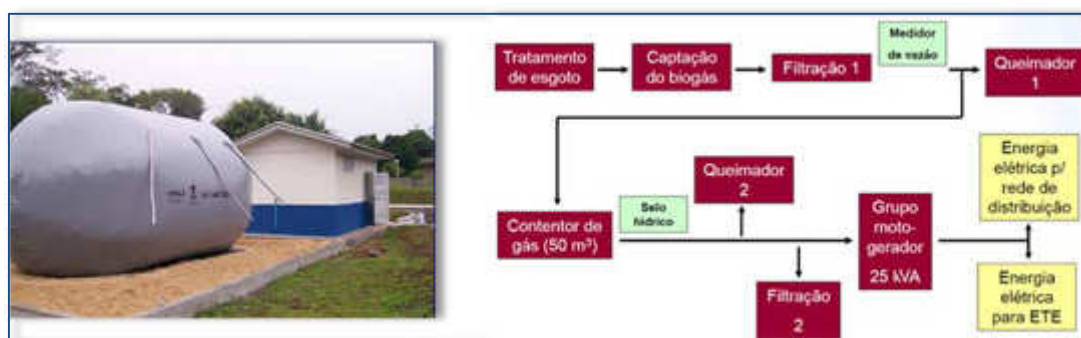


Figura 5.12 – ETE Ouro Verde / PR – 20 KW.
Fonte: Gomes (2016).

A ETE Ribeirão Preto, operada por meio de uma concessão à empresa Ambient, tem uma UTE em operação desde março de 2011. Esta utiliza o biogás dos digestores anaeróbios de lodo, e recupera a sua energia através de dois motores de combustão interna ciclo Otto. A ETE, segundo Ambient (2016), atendendo uma população de 560.000 habitantes, com sistema de tratamento de lodo ativado convencional, possui a planta de geração com biogás, com uma potência instalada de 1,5 MW e gera cerca de 14.544 kWh/dia, conseguindo suprir cerca de 51 % do consumo energético da planta.



Figura 5.13 - ETE Ribeirão Preto/ SP- 1,5 MW
Fonte: Ambient (2016)

A ETE Jacuípe II na Bahia, atendendo uma população de cerca de 100.000 habitantes com sistema de tratamento de esgoto UASB, inaugurou em 2016 a planta de biogás para gerar energia elétrica com um grupo moto-gerador de 200 KW. A planta de biogás é um projeto de P&D aprovado pela Aneel, conforme Platzer (2016)



Figura 5.14 – ETE Jacuípe II – Feira Santana – BA – 200 KW.
Fonte: Platzer (2016)

A ETE Arrudas da COPASA, conforme com sistema de lodo ativado convencional, trata cerca de 2000 L/s de esgoto, iniciou em 2011 o aproveitamento energético do biogás. Com uma potência instalada de 2,4 MW, a ETE Arrudas fica localizada em Belo Horizonte, e utiliza 12 microturbinas de 200kW cada para suprir cerca de 53 % do consumo elétrico da planta. Ressalta-se que a energia térmica do biogás é utilizada para aquecimento dos digestores de lodo. Gaio (2013). A Figura 5.9 no item 5.2.2.3 apresenta o esquema de geração da COPASA.



Figura 5.15 – ETE Arrudas/MG – Potência 2,4 MW.
Fonte: Gaio (2013)

Existem ainda ETEs em fase de projeto e construção (Figura 5.10 – Franca, Rio Preto, Belém, Ibité) que consideram o aproveitamento energético do biogás.

Um dos Projetos mais inovadores é o da SEMAE de São José do Rio Preto que, segundo Villani (2011) além de aproveitar o biogás dos reatores UASB, fará a secagem e queima do lodo juntamente com resíduos de poda do município. Este projeto, que está em fase de licitação, terá uma potência instalada de 2,5 MW na sua primeira fase, conforme Takahashi (2016).

5.4.2 Plantas em operação: Potencial de aproveitamento de biogás

O potencial de aproveitamento de biogás de ETE em produção no Brasil não é totalmente conhecido; encontra-se em Chernicharo (2016) o levantamento das ETEs em produção do distrito federal e de 9 estados (MG, SP, SC, RJ, ES, PR, BA, GO, MS); o total levantado foi de 1479 ETEs, envolvendo uma população de 73,7 milhões de habitantes (cerca de 48% da população urbana brasileira).

O Gráfico 5.4 apresenta o resultado da pesquisa com a quantidade e tipo de tratamento realizado nas ETEs, sendo: 637 ETE - Reatores UASB; 512 ETE - Lagoa de Estabilização; 147 ETE - Lodo Ativado e 143 ETE – Outros.

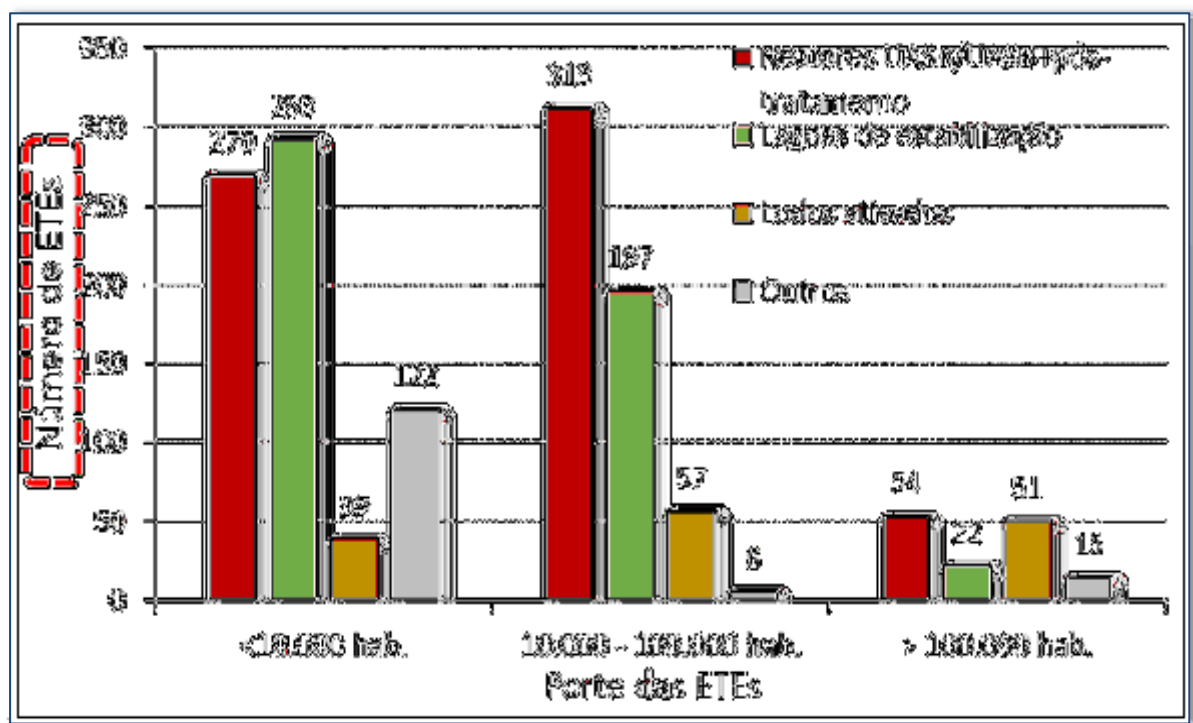


Gráfico 5.4 – Quantidade de ETE e respectivo tipo de tratamento.

Fonte: Chernicharo (2016)

Com base nos dados obtidos das ETEs e utilizando o modelo matemático do software Probio 1.0 Possetti (2015) para estimar a produção de metano e biogás em reatores UASB; foi considerado no cálculo a situação típica média do modelo e chegou-se a produção estimativa de geração de energia elétrica de 370 MWh/d indicada no Gráfico 5.5.

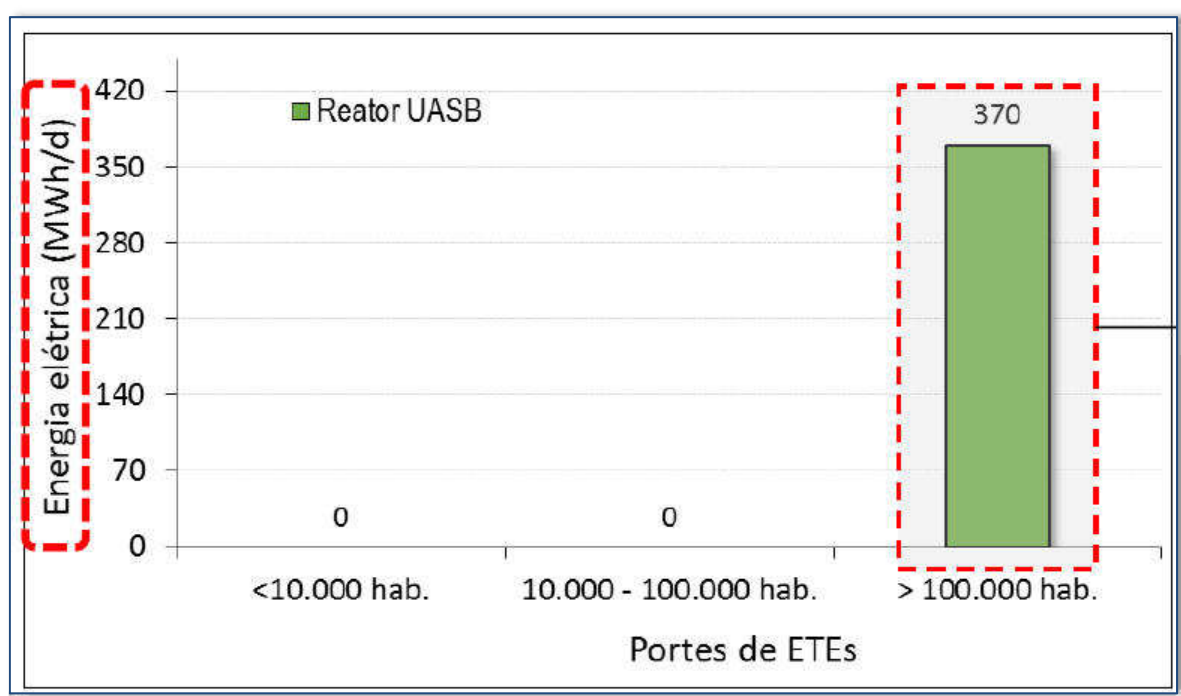


Gráfico 5.5 – Produção estimada de biogás nas ETE-s com reatores UASB

Fonte: Chernicharo (2016)

Para a geração de energia elétrica considerou-se somente as ETE's tratando esgoto de população superior a 100.000 habitantes, tendo-se em conta estudos Rosenfeldt (2016) que mostram que há viabilidade econômica a partir desta população.

Quanto à geração de somente energia térmica, o Gráfico 5.6 indica que a produção de energia térmica de forma econômica a partir do biogás poderia ocorrer em todas as ETE's, em diversas aplicações, sendo para ETE's que atendem população abaixo de 10.000 habitantes: cocção de alimentos, aquecimento de água, sanitização do lodo para uso agrícola nas imediações da ETE; já para ETEs acima de 10.000 habitantes, o aquecimento térmico tem possibilidade de reduzir em até 53% do volume do lodo transportado para aterro sanitário.

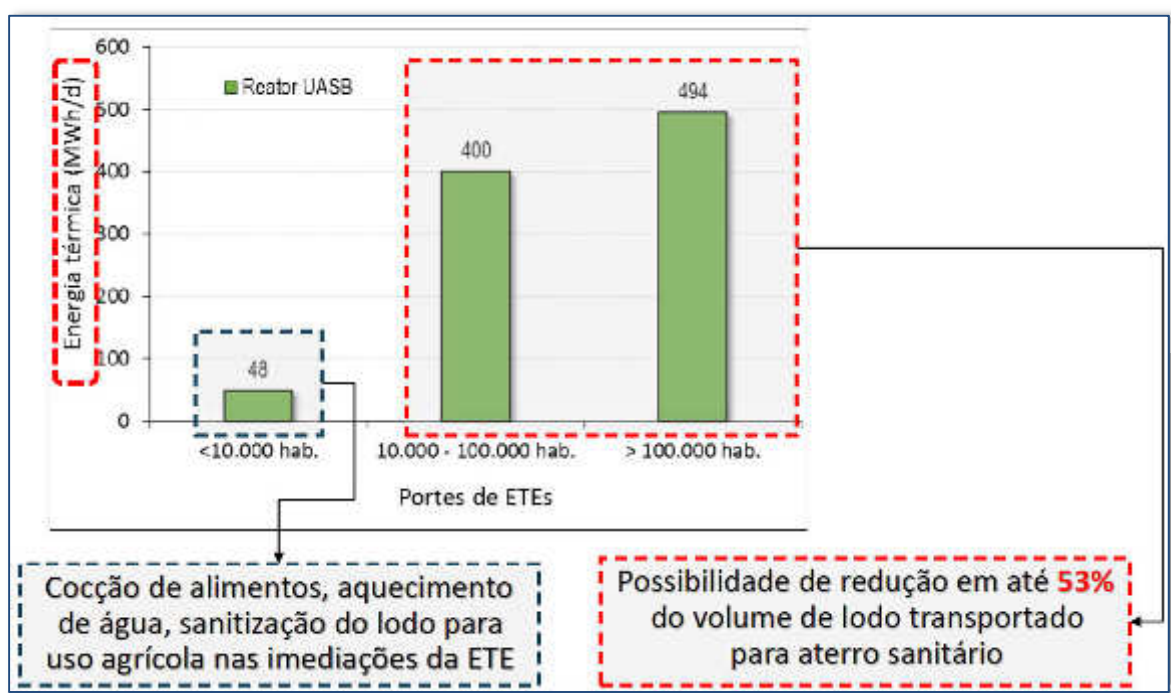


Gráfico 5.6 – Geração de energia térmica nas ETE's utilizando reatores UASB
Fonte: Chernicharo (2016)

Ressalta-se que o estudo de Chernicharo (2016) trata somente das ETE's com reatores UASB e em 9 estados e DF indicados acima, e nesse caso foram identificadas 54 ETE com potencial de uso energético; o estudo não considerou os digestores de lodo com potencial de aproveitamento energético do biogás.

Já o estudo apresentado em Rosenfeldt et al. (2016), realizado com ETES com vazão superior a 250l/s (população acima de 150.000 habitantes), identificou 51 estações com Reatores Anaeróbicos e 49 estações de com Lodos Ativados, resultando em 90 ETEs existentes no país que apresentam potencial de aproveitamento energético do biogás com viabilidade econômica e que podem se beneficiar de financiamento governamental para a planta de biogás, por ter vazão superior a 250 l/s. O estudo não foi finalizado ainda, e poderá sofrer variações.

5.4.3 Plantas a construir: Potencial de aproveitamento de biogás

Há um grande déficit de tratamento de esgotos existente no país. Segundo as informações levantadas pelo Atlas Brasil de Despoluição de Bacias Hidrográficas, preparado pela ANA – Agência Nacional de Águas, cerca de 70% dos 5.570 municípios, e aproximadamente 60% da população urbana brasileira, não dispõe de nenhum tipo de tratamento de esgoto. Observa-se na Figura 5.16 que se na região Sudeste há uma concentração de ETEs, o restante do Brasil é grande vazio.

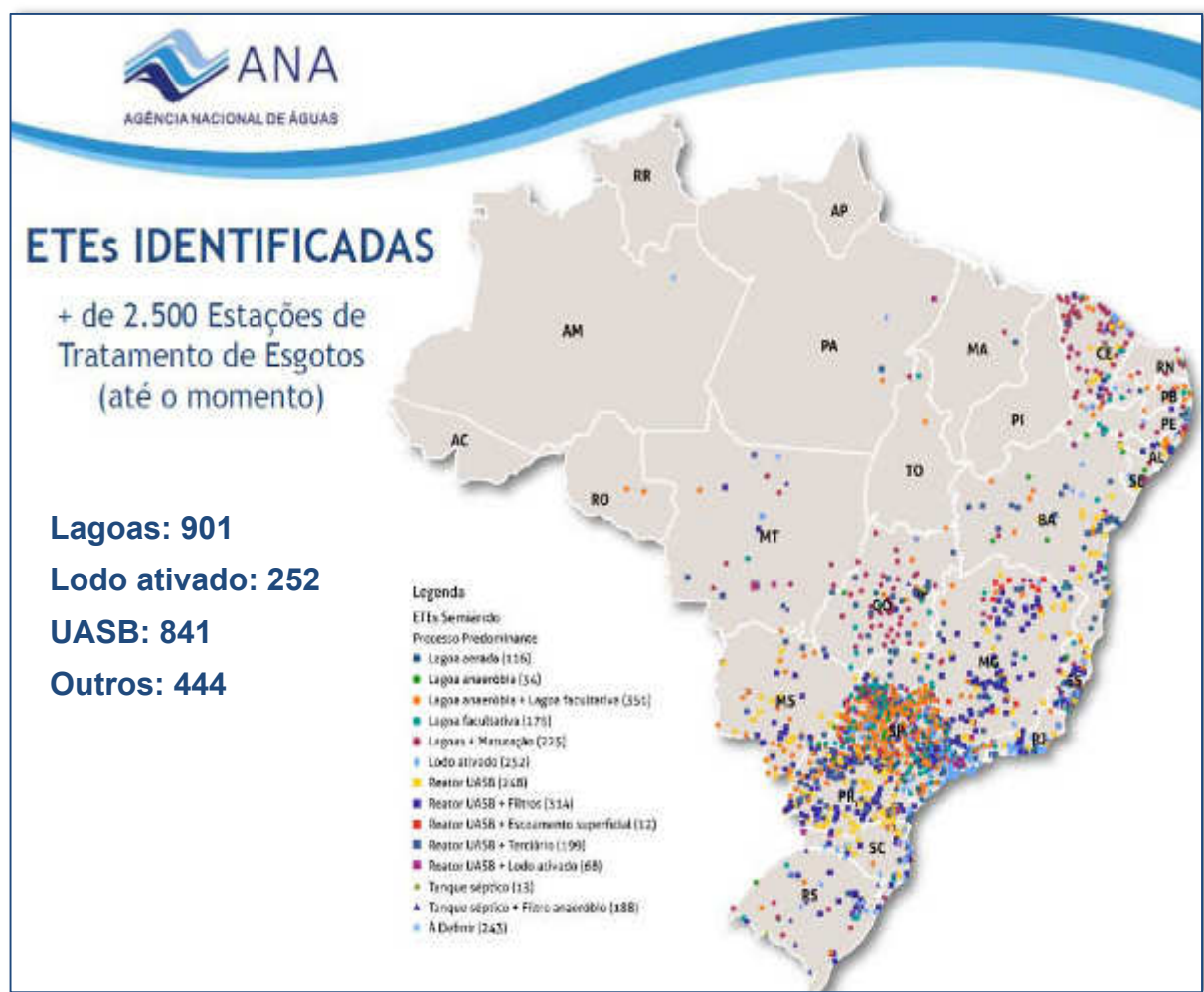


Figura 5.16 – ETEs no Brasil x tipo de tratamento.
Fonte: Ayrimoraes, S. (2015).

Segundo Rosenfeldt, et al. (2016), do total de municípios brasileiros, 264 possuem uma população urbana maior que 100.000 habitantes (população que é viável usar o biogás para geração elétrica), sendo que destes, 204 possuem cobertura de coleta de esgoto abaixo de 80%. Este fato revela um universo potencial para a implantação de novas ETEs com aproveitamento do biogás.

5.5 Avaliação econômica do aproveitamento do biogás de ETE no Brasil

O setor de saneamento brasileiro tem a convicção de que o uso energético do biogás de ETE não tem viabilidade econômica, conforme verifica-se em diversas referências como por exemplo Silveira et al. (2015) e também nas entrevistas com agentes do setor; a falta de viabilidade econômica é considerada a principal barreira para não se realizar o investimento em plantas de aproveitamento energético do biogás de ETE no país.

Esta convicção do setor de saneamento pode não ser correta em diversas situações; comenta-se abaixo estudos que indicam que o aproveitamento do biogás pode ter sim viabilidade econômica: a) Valente (2015), b) Rosenfeldt, S. et al (2016) e c) Semae (2016). Naturalmente é provável que há diversos outros estudos realizados pelas prestadoras de serviço que indicam que há viabilidade econômica/financeira no aproveitamento do biogás, mas que os projetos não foram implantados devido a outras barreiras.

a) Valente (2015) - O trabalho de Valente (2015) avaliou a viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás em ETEs que servem entre 50.000 e 450.000 habitantes, para cinco diferentes arranjos: 1-Geração com eletricidade contínua, 2-Geração no horário de ponta, 3-Cogeração com secagem parcial do lodo, 4-Secagem do lodo com geração de eletricidade para auto suprimento do secador e 5-Somente secagem do lodo. A tecnologia de tratamento biológico considerada foi um reator UASB seguido de pós-tratamento com lodos ativados. A conclusão do estudo é que a escala mínima de viabilidade, com TIR acima de 8% a.a., para os diferentes arranjos, encontra-se entre 100.000 e 200.000 habitantes. Este cenário indica que em mais de 172 municípios brasileiros essa alternativa poderia ser economicamente viável, para cenários menos conservadores, em até 300 municípios, ou cerca de 57% da população brasileira.

b) Rosenfeldt, S. et al. (2016) - Já o estudo “Viabilidade Técnica-Econômica de Produção de Energia Elétrica em ETEs a Partir do Biogás” de Rosenfeldt, S. et al. (2016), compara três tecnologias de tratamento de esgoto, sendo duas delas são capazes de gerar biogás: O reator UASB e o digestor anaeróbico de lodo. Foram comparadas as configurações apresentadas a seguir, considerando uma contribuição de esgotos provenientes de uma população de 100.000 habitantes:

- Lodos ativados de aeração prolongada (arranjo sem etapa anaeróbica);
- Lodos ativados convencional, seguido de tratamento anaeróbico de lodo (digestor), com e sem aproveitamento energético do biogás gerado;
- Reator UASB, seguido de lodos ativados convencional, com e sem aproveitamento energético do biogás gerado.

Segundo o estudo acima, a configuração que se mostrou mais vantajosa foi o sistema de UASB combinado com lodo ativado convencional e com uso do biogás para a produção de energia elétrica.

Conforme Rosenfeldt, S. et al. (2016) a análise realizada somente sobre a linha de aproveitamento de biogás considerando seus custos de implantação (sistema de coleta, transporte, tratamento e armazenamento do biogás, e motor-gerador) e operação, e as receitas oriundas da geração de energia elétrica, demonstra que a implantação da linha de biogás proveniente de Digestores de Lodo e de Reatores UASB apresenta viabilidade econômica para o universo estudado, com Taxas Internas de Retorno de 20,37% e 19,21%, respectivamente, considerando a Taxa Mínima de Atratividade de 8,7%. Para uma escala de 100.000 habitantes, o custo de implantação da linha de aproveitamento de biogás foi estimado em R\$ 2.329.149,11, já considerando o BDI.

Rosenfeldt, S. et al. (2016) destaca que as soluções com o uso energético do biogás gerado se mostraram mais vantajosas quando comparadas a mesma tecnologia de tratamento de efluentes, mas sem o uso energético do biogás. O aproveitamento energético do biogás tornou a alternativa “Reator UASB seguido de Lodos Ativados” 9,1% mais barata e a alternativa ‘Lodos Ativados seguido de Digestor de Lodo’ 6,9% mais barata no universo temporal estudado.

c) **Villani et al. (2011)** - O terceiro trabalho é o estudo técnico de viabilidade para implantar a cogeração de energia a partir do biogás e do lodo proveniente dos reatores anaeróbicos da ETE Rio Preto da SEMAE / Prefeitura de São José do Rio Preto – SP, que utiliza reatores UASB seguido de lodo ativado convencional. A ETE considera que tratará esgoto de uma população de 584.000 habitantes, com afluência estimada em 1340 litros/s.

A planta de aproveitamento energético do biogás, gerando cerca de 7.800 Nm³ de biogás por dia, foi dimensionada para a cogeração de eletricidade e energia térmica para a secagem de lodo, utilizando 2 x motores ciclo Otto de 788 KW cada e caldeira/turbo-gerador (ciclo Rankine) de 1000 KW queimando lodo.

O relatório acima conclui que a solução aproveitando o biogás e o lodo digerido desidratado é sustentável, reduz o custo operacional da ETE, se paga num prazo que varia de 5 a 7 anos, e ao longo de sua vida útil será capaz de gerar receitas para fazer face aos custos necessários para as futuras ampliações da capacidade de tratamento de esgoto da planta, utilizando-se do custo evitado na disposição do lodo em aterro sanitário e a redução da conta de energia elétrica a ser comprada da concessionária.

Atualmente o investimento está aprovado no âmbito do programa governamental PAC, com o projeto previsto para iniciar em 2017, esperando que o novo prefeito que ganhou as eleições assuma a prefeitura e libere o início do projeto.

Concluindo, pode-se afirmar que o aproveitamento energético do biogás deve ser estudado caso a caso para se verificar a viabilidade econômica do investimento; caso haja viabilidade, será uma solução para a aumentar a eficiência energética da ETE, e se for uma ETE nova, poderá inclusive viabilizar o investimento como um todo, pois contribuirá para a redução do custo total do empreendimento.

6. BARREIRAS E OPORTUNIDADES PARA PRODUÇÃO E USO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE ETE

6.1 – Entrevista com agentes do setor: Barreiras e Oportunidades

Entre julho e novembro de 2016 foram realizadas entrevistas abertas com 16 agentes do setor de saneamento / tratamento de esgoto, envolvendo representantes de prestadores de serviço, empresa de engenharia, fornecedores, entidade de classe, governamentais e da academia, fazendo a seguinte pergunta: Quais barreiras e oportunidade você vê para o aproveitamento energético do biogás de estação de tratamento de esgoto?

As entrevistas foram realizadas por telefone, por email e pessoalmente durante visita à ETE, escritório de trabalho, Seminário: IV Seminário Internacional sobre aproveitamento de biogás de ETE – Curitiba/PR e Workshop: contribuição do biometano para aumentar a oferta de gás natural em São Paulo – Projeto 27; e feira do setor de saneamento (Fenasan – Feira Nacional do Saneamento / SP).

As respostas foram diversas dependendo da atividade do entrevistado, mas no conjunto foram praticamente as mesmas barreiras e oportunidades identificadas na literatura e que estão sintetizadas em seu conjunto nos itens 6.2 – Barreiras e 6.3 – Oportunidades desta monografia.

Destacam-se inicialmente que as principais barreiras são: que não há viabilidade econômica; que o investimento tem retorno financeiro de mais de 7 anos e não é aprovado pelo financeiro; que os equipamentos são importados e falta suporte local; que falta conhecimento na aplicação; que os reatores UASB tem problemas; que o setor não é inovador; que há outras prioridades tais como expandir a rede de coleta de esgoto; que o custo da energia elétrica ainda é barato para o setor; que a empresa de saneamento não investe na rede de esgoto e isto reduz a produção de biogás e etc.

Quanto a oportunidades, as mais citadas são: a redução de emissão de gases de efeito estufa já que seria evitado a queima e vazamentos; reduzir custos com energia e reduzir custos com gerenciamento do lodo fazendo a secagem do lodo usando biogás.

Em geral, há o sentimento de que o setor somente fará o aproveitamento do biogás se for forçado por alguma condição externa, por exemplo, regulação ambiental que proíba a queima do biogás ou outra condição do governo que obrigue o setor a utilizar o biogás por questão de eficiência energética, por exemplo.

6.2 Barreiras

O biogás é uma fonte de energia renovável e vem se destacando no mercado internacional principalmente nos países europeus. Na Europa, a capacidade instalada de plantas de biogás é superior 8.000 MW; enquanto que nos EUA é cerca de 2000 MW (veja item 5.3). Já no Brasil, há poucas plantas de biogás (total de 127 plantas para todos os setores), sendo que no setor de tratamento de esgoto há somente 7 plantas fazendo o aproveitamento energético do biogás. A questão que se faz então é: por que há poucas ETEs no Brasil fazendo o aproveitamento energético do biogás, considerando que o biogás é uma fonte renovável e cujo aproveitamento poderia contribuir para a redução de custos operacionais da ETE?

Objetivando responder à pergunta acima, apresenta-se abaixo as principais barreiras e oportunidades identificadas na literatura e em entrevistas abertas com agentes do setor, classificadas nos seguintes temas:

6.2.1 A Cadeia produtiva de bens e serviços para o uso energético do biogás é incipiente no Brasil

Uma das grandes barreiras para a adoção do uso energético do biogás, é a falta de uma cadeia produtiva de bens e serviços madura no Brasil, o que causa aumento de custos e incertezas quanto ao sucesso do projeto.

A grande maioria dos equipamentos para o uso do biogás são importados, o que aumenta os custos substancialmente tanto de aquisição como posteriormente os custos de operação e manutenção, notadamente face aos impostos envolvidos na importação. Já no desenvolvimento do projeto falta equipe local dos fabricantes para esclarecimentos técnicos, o que dificulta o processo de preparar especificações e mesmo de desenvolvimento do projeto. Os prazos envolvidos na importação dos equipamentos são alto e dificuldades com alfândega pode levar a atrasos nos empreendimentos.

Espera-se que com a aprovação das propostas do PNBB ABiogás (2015), a cadeia produtiva do biogás possa ser incentivada a desenvolver-se no Brasil, o que certamente facilitará a redução da barreira tecnológica e aumentará a viabilidade econômica de diversos projetos.

6.2.2 Produção de biogás em reatores UASB com tecnologia ainda em desenvolvimento

A tecnologia para a produção do biogás em reatores UASB ainda está em aprimoramento, o que levanta diversas críticas das empresas de serviços quanto ao uso desta tecnologia, muitas vezes por falta de conhecimento sobre o estado da arte

Acredita-se que a emissão do “Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto –Silveira et al. (2015), possibilite a disseminação de conhecimentos no setor de projeto, operação e manutenção, bem como nos agentes responsáveis por tomada de decisão sobre o aproveitamento energético do biogás, facilitando assim a adoção desta tecnologia.

Conforme for implantado plantas pioneiras com reatores UASB com o aproveitamento do biogás, seguindo as instruções do guia acima, certamente a disseminação de conhecimentos desta inovação no setor ocorrerá de forma mais rápida.

O item 5.4.1 apresenta as plantas de biogás no Brasil em operação e fase de implantação. Certamente o sucesso destas plantas será fundamental para reduzir barreiras na implantação de projetos de aproveitamento energético de biogás.

6.2.3 Inexistência de políticas específicas para o biogás

Segundo a ABiogás (2015) o baixo aproveitamento energético do biogás no Brasil é um conjunto de barreiras que desestimulam o investimento por empresas não só de tratamento de esgoto, mas também por empresas que operam com resíduos sólidos urbanos, agronegócio de alimentos e sucroenergético que poderiam produzir e aproveitar o biogás. Entre as diversas barreiras, destaca-se a inexistência de políticas específicas relacionadas ao biogás, o que levou a ABiogás a emitir o documento: Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano ABiogás (2015) com o objetivo principal de promover um cenário institucional, econômico, normativo e regulatório, que proporcione condições favoráveis e estáveis que dê segurança ao investidor.

As barreiras e propostas relacionadas no documento Abiogás (2015), estão alinhadas com o documento “Barreiras e Propostas de Soluções para o Mercado de Biogás no Brasil” Jender, O. et al. (2016), o qual resultou de pesquisa com agentes do setor de saneamento realizada no âmbito do projeto Probiogás. Esta pesquisa é tratada mais em detalhes no item 6.2.7.

Espera-se agora que a efetivação das propostas atinja o objetivo principal do PNBB que é proporcionar condições favoráveis e estáveis necessárias para estimular e assegurar a produção e aplicações do biogás e do biometano como fontes energéticas renováveis, integradas à matriz energética nacional, contribuindo para a oferta territorial local e regional de energia elétrica, térmica e combustível, para promover a eficiência energética e a sustentabilidade de setores produtivos e para a inclusão social produtiva, com a geração de renda e empregos.

6.2.4 Falta de viabilidade econômica do projeto

Segundo Silveira et al. (2015) existe a convicção no setor de saneamento brasileiro de que o uso energético do biogás em ETE é uma solução para o futuro, sendo que muitas prestadoras de serviços pensam que a principal razão para a reduzida quantidade de projetos é a falta de viabilidade econômica.

No entanto, estudo recentemente publicado “Viabilidade Técnico-econômica de Produção de Energia Elétrica em ETEs a partir do Biogás” Rosenfeldt et al. (2016) mostra que ETE’s concebidas para atender entre 100.000 e 200.000 habitantes teriam condições de usar o biogás para a geração de calor e eletricidade com taxas internas de retorno entre 8 e 25%; já no estudo de Valente (2015), mostra-se que para ETEs com reatores UASB que atendem entre 200.000 e 450.000 habitantes, estas taxas podem variar de 14 a 79%.

No que refere somente ao aproveitamento de energia térmica, encontra-se no item 5.4.2 o levantamento realizado em Chernicharo (2016) sobre o potencial de aproveitamento do biogás em ETE’s com reatores UASB que atendem pequenas populações com reatores UASB.

Verifica-se então que a barreira econômica para muitos casos pode não existir, mas mesmo nestes casos onde há viabilidade econômica o projeto não é realizado ou é postergado, o que mostra que há outras barreiras que impedem o desenvolvimento do projeto.

Segue nos itens abaixo barreiras relacionadas pela CNI (2016), pela Abiogás (2015) e outras fontes que ajudam a explicar a razão pela qual na sua grande maioria as empresas do setor de saneamento não investem na produção e uso do biogás.

6.2.5 Aversão à inovação e à mudanças no setor de saneamento

A produção e uso do biogás nas ETE's, apesar de não ser um assunto novo (veja item 5.1) pode ser entendido como uma inovação no setor, o que leva a mudanças do "status quo" dos funcionários das empresas de saneamento, os quais devido à natureza do setor formado por empresas públicas, são em grande parte conservadores e avessos a mudanças, conforme Zuffo (2016a).

Esta barreira, associada à barreira "deficiência na gestão das empresas públicas" apresentada no item a seguir, pode ser um grande entrave a ser transposto mesmo se o fator econômico não for uma barreira, pois os funcionários tenderão a ver esta nova tecnologia como muito complexa, de difícil implantação e que causará problemas para o objetivo básico da planta que é fazer o tratamento do esgoto e não gerar energia. Desta forma os chamados "fatores humanos" tais como: processo decisório que integra aspectos econômicos com riscos associados a complexidades incertezas, etc; inércia, devido a ser contra mudanças; experiência e conhecimento na nova tecnologia; comunicação para atendimento às regulações das empresas concessionárias de eletricidade, gás e ambientais, etc; levam a que os projetos sejam rejeitados ou sequer sejam apresentados para análise de viabilidade.

A empresas que não têm a prática de implantar novas tecnologias que normalmente levam a mudanças no "status quo", necessitam de um plano para introduzir na ETE a produção e uso do biogás, pois haverá diversas forças contrárias à implantação do projeto. Neste caso recomenda-se adotar um processo de introdução de mudanças, onde a teoria de difusão de inovação pode ser de ajuda. Em todos os casos, para o sucesso do projeto sempre será necessário ter um padrinho do projeto com força na organização (normalmente um executivo da alta administração) e um gerente de projeto efetivamente entusiasta da nova tecnologia e comprometido com o projeto. Willis, J. (2012).

É interessante apresentar aqui que nos EUA o aproveitamento do biogás em ETEs também é pequeno face ao potencial existente (conforme item 5.3) e que as barreiras existentes nas empresas de saneamento americanas para este aproveitamento são similares às barreiras existentes nas empresas brasileiras, o que pode ser verificado pelas principais categorias de barreiras encontradas nos EUA e reportadas no documento Willis (2012) abaixo apresentadas:

Tabela 6.1 – Principais grupos de barreiras para o uso do biogás de ETEs nos EUA

GRUPOS DE BARREIRAS	DESCRIÇÃO GERAL
Viabilidade econômica / <i>payback</i> inadequados	A viabilidade econômica não justifica o investimento para o uso energético do biogás.
Falta de capital	Há outras necessidades prioritárias para o pouco capital disponível
Experiência e Conhecimento	Preocupações com complicações na operação e manutenção – preocupação com a falta de experiência do pessoal próprio e também com prestadores externos de serviços na planta e biogás e geração energia elétrica/térmica.
Preocupações com a efetividade / maturidade da tecnologia	Incertezas com os custos e com as dificuldades técnicas que serão encontradas na operação e manutenção de um sistema complexo, considerando qualidade do biogás e sistema de limpeza.
Falta de liderança interna e da comunidade ou falta de interesse com energia renovável	O benefício ambiental não fornece justificção adequada para a implementação do projeto.
Manter o “ <i>status quo</i> ”	Nosso objetivo é produzir água limpa e atender os critérios da legislação. Gerar energia não é nosso objetivo.

Fonte: Willis (2012)

Considerando que o Brasil e os EUA estão praticamente no estágio inicial de implementação de projetos de produção e aproveitamento energético de biogás de ETE, diferentemente do que ocorre nos países europeus onde o aproveitamento energético do biogás já está no estágio avançado, recomenda-se acompanhar o processo de expansão desta tecnologia nos EUA e se possível aproveitar lições apreendidas.

6.2.6 Deficiência na gestão das empresas de saneamento

Certamente uma grande barreira para a produção e uso do biogás é a própria característica do setor de saneamento. Conforme indicado no item 2.4, o relatório CNI (2016) apresenta que a maioria das companhias de saneamento básico, geridas pelos municípios ou pelos estados, tem como característica principal uma grande ineficiência. Essas empresas, com raras exceções, não conseguem financiar a expansão ou modernização da própria infraestrutura, condição necessária para a melhoria dos serviços oferecidos.

As propostas do relatório CNI (2016) abaixo relacionadas para transpor esta deficiência de gestão, vão na direção de incentivar a produção e uso do biogás:

- a) Definir padrões de eficiência mediante o estabelecimento de indicadores de gestão e de níveis mínimos de investimento com a liberação de recursos condicionada à adoção de políticas e programas orientados pela consecução das metas estabelecidas.*
- b) Implementar programas de incentivo orientados para projetos eficientes e melhorias na gestão (boas práticas).*
- c) Sinalizar, para os estados e municípios, a importância de buscar parcerias e divisar oportunidades que não esgotem a sua capacidade de alavancar investimentos, especialmente no segmento de esgotamento sanitário, que se encontra em situação mais crítica.*
- d) Criar políticas e planos que induzam tanto à economia e ao reuso de água, como à redução das perdas de distribuição e de faturamento.*
- e) Criar políticas e planos que permitam novas receitas para as companhias de saneamento, como a venda bruta de água.*

Criar mecanismos para difundir experiências bem-sucedidas na busca por alternativas de receitas e melhor saúde financeira das companhias

6.2.7 Barreiras identificadas na pesquisa Probiogás

Uma pesquisa realizada entre janeiro a março de 2014, no âmbito do projeto Probiogás, com 38 empresas e instituições atuantes no Brasil do setor de biogás, incluindo o setor de tratamento de esgoto, identificou 27 barreiras para o uso energético do biogás; estas barreiras foram classificadas nos seguintes grupos:

Enfoque A: Relação incerta entre o custo de projeto e seu benefício comercial

Enfoque B: Reduzida quantidade de projetos de referência bem-sucedidos em escala comercial

Enfoque C: Dificuldade de acesso a informações

Enfoque D: Inexistência de políticas específicas relacionadas a biogás

As barreiras identificadas na pesquisa e os respectivos impactos e propostas para de soluções, foram divulgadas no documento: Barreiras e Propostas de Soluções para o Mercado de Biogás no Brasil Jender et al. (2016). Um resumo completo da pesquisa é apresentado no Anexo A.

De uma forma geral, as barreiras identificadas na pesquisa podem ser associadas ao grupo de 6 barreiras relacionadas acima, e estão associadas à impactos nos custos e na viabilidade econômica dos projetos. Nota-se que a pesquisa não apresenta diretamente as barreiras 2 e 3 acima: “Deficiência na gestão das empresas de saneamento” e “Aversão a inovação e a mudanças no setor de saneamento”, provavelmente pelos aspectos políticos e pela reação negativa que estas barreiras possam resultar de algumas empresas.

Salienta-se que em geral não é uma barreira que impede o desenvolvimento de um projeto, mas sim um conjunto de barreiras que vai aumentando a dúvida sobre o negócio até chegar ao ponto em que o investido desiste do investimento. Portanto, é o conjunto de medidas e também o conjunto de soluções que deve ser considerado quando tratando de desenvolver um projeto.

6.3 Oportunidades

Até há alguns anos atrás praticamente não havia incentivos para o uso do biogás, prevalecendo somente barreiras, o que também justifica a baixa quantidade de plantas de aproveitamento energético no Brasil. Já há cerca de cinco anos, diversas condições conjunturais relacionadas à economia, meio ambiente e políticas sociais vêm criando incentivos, portanto oportunidades, para o incremento da produção e uso de biogás de estação de tratamento de esgoto. Adicionalmente, o projeto - Probiogás que visa reduzir barreiras e incentivar o uso do biogás produziu resultados que potencializam as oportunidades barreiras ao ajudar a reduzir barreiras.

Segue abaixo as principais condições que direta ou indiretamente cria oportunidades para o uso do biogás:

6.3.1 Incentivos para o uso de energia renovável e geração distribuída

Os esforços do governo e da sociedade para aumentar a participação de energias renováveis e geração distribuída na matriz energética brasileira, e para reduzir a participação dos combustíveis fósseis e geração centralizada, visando reduzir a emissão de gases indutores de efeito estufa, aumento da segurança energética e redução dos custos, já que os combustíveis fósseis são mais caros para a geração elétrica.

Neste contexto o governo vem criando incentivos criam que oportunidades para a produção e uso do biogás, tais como as abaixo:

- Regulações normativas da Aneel REN 482/2012 e a REN 687/2015 (que atualiza a REN 482) que incentiva produção de energia elétrica distribuída;
- Alguns estados (SP, MG) isentam de ICMS equipamentos para geração de energia a partir do biogás; etc.

6.3.2 Desenvolvimento da cadeia produtiva do biogás

O projeto Probiogás, iniciado em 2013 término definido para 2017 e que produziu resultados que contribuem para a redução de diversas barreiras nas seguintes áreas, que contribuem para o desenvolvimento da cadeia produtiva segundo Moreira (2016):

- Regulação e incentivos: Foram emitidos decretos e leis federais e estaduais para facilitar / incentivar o uso do biogás (veja oportunidade 3 acima)
- -Sociedade civil e Governo mais articulados, com:
 - Fundação de associações de biogás (ABiogás – Associação Brasileira de Biogás e Biometano), com a emissão pela Abiogás de uma Proposta para um PNBB- Plano Nacional do Biogás e Biometano.
 - Formado o Comitê Gestor de Biogás, com representantes de diversos ministérios: Minas e energia, Meio ambiente, Cidades, Comércio e indústria, Ciência e tecnologia com atuação no tema.
 - Desenvolvido Rede de pesquisa em esgotos
- Capacitação: Criação de diversos cursos de capacitação em biogás, desde viabilidade técnica, projeto de ETE, Segurança, Operação, etc.
- Informações técnicas: Emitidos diversos guias técnicos, que contribuem para a disseminação de conhecimento na produção e uso de biogás.
- Cooperação científica: Desenvolvido projetos de cooperação científica
- Cadeia de Valor: Desenvolvida a Cadeia de Valor com busca on-line por empresas fornecedoras, no site da ABiogás; pesquisa para identificar barreiras e propor soluções para o mercado de biogás.

6.3.3 Reatores UASB & Pesquisa e Desenvolvimento

Atualmente os reatores anaeróbicos UASB, apesar de suas desvantagens, têm sido amplamente selecionados para o sistema de tratamento em novas ETEs devido às suas vantagens como: menor custo de implantação, baixa produção de lodo, baixo consumo de energia, baixo consumo operacional, baixa demanda de área, etc. A tecnologia UASB produz o metano, portanto plantas de biogás podem ser planejadas e se possível implantadas já no desenvolvimento do projeto da ETE. As iniciativas no âmbito do projeto Probiogás tem incentivado a pesquisa e o desenvolvimento da tecnologia dos reatores UASB; como exemplo tem-se a emissão do guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto, medição on-line da produção do biogás em 10 ETEs no Brasil para estudo e melhoria da produção do biogás, etc, projeto Jacuípe II na Bahia de 200 KW como referência para novos projetos similares, etc.

6.3.4 O Plansab e Financiamento para planta de biogás

Conforme apresentado no item 2.1.4, o Plansab prevê a necessidade de investimentos vultuosos no setor de saneamento para que até 2033 seja atingido a meta de se ter 93% de esgoto tratado adequadamente na zona urbana, o que abre grandes oportunidades para o aproveitamento do biogás, já que será necessário a construção de novas ETEs e a atualização de ETEs existentes.

Considerando que a linha de financiamento público para projetos de saneamento no âmbito dos Ministério das Cidades, exige que as ETEs anaeróbicas sejam projetadas para o aproveitamento do biogás, e que é possível obter financiamento público no programa “Saneamento para Todos” para plantas de biogás em ETEs com vazão média afluente superior a 250 l/s. (Instrução Normativa - IN 3, de 1/3/2016), é provável que vários projetos possam implementar o uso do biogás já na construção, ou, ou a médio prazo assim que o investidor sentir-se mais seguro em fazer este investimento.

6.3.5 Custo crescente da energia elétrica: Busca de eficiência energética

A energia elétrica barata e subsidiada para o setor de saneamento sempre foi uma barreira para o aproveitamento energético biogás, pois inviabilizava o investimento para o uso desta energia; atualmente os custos crescentes com energia elétrica (quer pela escassez hídrica que obriga a fazer geração elétrica com combustíveis fósseis; quer o aumento de custos devido a restrições ambientais crescentes que obriga utilizar mais energia para secar lodo) tem levado as empresas prestadoras de serviços de saneamento a buscar alternativas para reduzir custos e ser mais eficiente na utilização dos recursos.

É neste contexto que o biogás aparece como uma alternativa a ser considerada, pois já está disponível e fica cada vez mais justificar o não aproveitamento. Salienta-se que atualmente há pelo governo e pela sociedade uma forte pressão para que as empresas prestadoras de serviços em saneamento busquem a eficiência operacional, pois não é mais aceitável que estas empresas transfiram para a sociedade a suas ineficiências via tarifa.

6.3.6 Regulação ambiental crescente / Lei 12.305 – PNRS

A Lei 12.305/2010, que institui a política nacional de resíduos sólidos - PNRS faz com que o lodo gerado nas ETEs praticamente não mais poderá ser enviado aos aterros sanitários; tal condição leva a que as empresas de saneamento deverão buscar soluções de forma a se adequarem à legislação, o que certamente acarretará o aumento dos custos do gerenciamento do lodo.

O aproveitamento energético do biogás para a secagem do lodo, quer queimando diretamente, quer utilizando gases de motores a gás operando em cogeração certamente reduzirá os custos deste gerenciamento do lodo. (vide item 2.3.3 e Apêndice C para maiores informações sobre gerenciamento do lodo).

Outra condição ambiental que certamente será objeto de leis e/ou monitorações mais restritivas refere-se à emissão de biogás para a atmosfera. Atualmente o biogás é queimado e às vezes de forma incompleta, o que leva ao aumento da poluição e aumento de emissão de gases indutores de efeito estufa. Outra situação operacional inadequada é que as ETE's têm fuga de biogás por problemas de projeto, operação ou manutenção, o que demandará que as empresas de saneamento façam investimentos para minimizarem estas fugas de biogás, independentemente do aproveitamento do biogás.

Certamente o aumento dos custos para se adequarem à legislação ambiental fará com que as empresas considerem o aproveitamento energético do biogás como uma oportunidade para a redução de custos operacionais.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho teve como objetivo identificar as barreiras e as oportunidades para o aproveitamento energético do biogás de estação de tratamento de esgoto – ETE para responder à pergunta: por que no Brasil há poucas ETES fazendo o aproveitamento energético do biogás?

A questão é relevante pois o biogás de ETE, com reatores ou digestores anaeróbicos, é uma fonte de energia renovável que possibilita a geração de energia térmica, energia elétrica ou ambas simultaneamente, contribuindo assim para reduzir os custos com energia que em muitos casos é o segundo maior custo da operação de uma ETE. Outra condição é que nos países desenvolvidos o uso do biogás de ETE é amplamente difundido, o que demonstra que o Brasil pode estar desperdiçando esta fonte de energia, já que o biogás é simplesmente queimado na maioria das ETES brasileiras.

Através da revisão bibliográfica, participação em seminários e entrevistas com agentes do setor de tratamento de esgoto, foram identificadas as principais barreiras e oportunidades indicadas resumidamente a seguir.

A) BARREIRAS

As principais barreiras que foram identificadas como as principais causas para não se fazer o aproveitamento do biogás de ETE são conforme classes abaixo:

- 1- Cadeia produtiva para produção e uso do biogás ainda é incipiente no Brasil
- 2- Produção de biogás em reatores UASB com tecnologia ainda em desenvolvimento
- 3- Inexistência de políticas específicas para o biogás
- 4- Falta de viabilidade econômica do projeto
- 5- Aversão a inovação e a mudanças no setor de saneamento
- 6- Deficiência na gestão das empresas de saneamento

De fato, as barreiras 1 e 2 de carácter tecnológico e as barreiras 3 e 4 de carácter econômico, são normalmente identificadas como as causas principais para não se fazer o aproveitamento do biogás. Já as barreiras 5 e 6 raramente são citadas na revisão bibliográfica, face ao carácter “cultural” e das implicações políticas que as mesmas carregam. Somente através das entrevistas é que alguns agentes do setor de saneamento falam abertamente sobre estas barreiras.

A literatura mostra que há viabilidade técnica e econômica para o aproveitamento do biogás para gerar eletricidade em ETEs atendendo uma população maior que 100.000 habitantes (a literatura mostra que há pelo menos 90 ETEs nesta condição); para população menor, atualmente somente o aproveitamento térmico é viável, sendo que se houver maiores incentivos e/ou for desenvolvida uma cadeia produtiva nacional que baixe os custos dos equipamentos, então projetos de aproveitamento do biogás para gerar eletricidade em ETEs menores também poderão ter viabilidade econômica, dependendo de estudo caso a caso.

Considerando que na grande maioria das ETEs que geram biogás (mais de 500) pode ser viável de alguma forma usar energeticamente o biogás e não queimar simplesmente, a conclusão que se pode chegar é que as barreiras 4 e 5 são preponderantes para se entender porque não é realizado o aproveitamento energético do biogás.

B) OPORTUNIDADES

As oportunidades identificadas que incentivam o aproveitamento energético do biogás estão resumidas nas classes abaixo:

- 1- Incentivos para o uso de energia renovável e geração distribuída
- 2- Esforços para desenvolver a matriz produtiva
- 3- Reatores UASB & Pesquisa e Desenvolvimento
- 4- Plansab e Financiamento para plantas de biogás
- 5- Custo crescente da energia elétrica: Busca de eficiência energética
- 6- Regulação ambiental crescente: Lei 12.305 – PNRS

Considerando o baixo aproveitamento do biogás, as oportunidades existentes não têm sido suficientes para transpor as barreiras existentes. As oportunidades 1 a 4 de carácter econômico e tecnológico são muito importantes e precisam ser consolidadas e ampliadas para a efetiva implantação de projetos de plantas de biogás em ETE. As oportunidades 5 e 6 são as que efetivamente tem levado as empresas de saneamento a se voltarem para o aproveitamento do biogás. De fato, a regulação ambiental tem fator preponderante neste processo, pois é um fator impositivo que força as empresas a transpor as barreiras cultural referente a inovação no setor e a barreira da burocracia e ineficiência de muitas empresas públicas.

A pergunta “por que no Brasil há poucas ETEs fazendo o aproveitamento energético do biogás”? fica respondida pelas barreiras e pelas oportunidades encontradas.

Não é objetivo desta monografia identificar propostas de soluções para se transpor as barreiras, a exemplo das barreiras e respectivas propostas de ações apresentadas no Anexo A, apesar de em diversos capítulos terem sido apresentadas propostas de soluções e ações para incentivar o aumento do uso energético do biogás face ao potencial existente em diversas ETEs para este aumento.

Outro aspecto altamente relevante apresentado nesta monografia é que o setor de saneamento com os baixos índices de coleta e tratamento de esgoto necessita urgentemente ser desenvolvido, com resultados esperados em: melhoria das condições de saúde, com impactos sobretudo nos indicadores de saúde infantil, a exemplo da mortalidade infantil; proteção do meio ambiente, especialmente água e solo; contribuição para a redução da pobreza; desenvolvimento urbano, econômico e social.

É neste contexto de melhoria do saneamento que o aproveitamento do biogás de ETE tem impacto altamente positivo na sustentabilidade econômica e financeira, na melhoria do meio ambiente, na qualidade dos processos de tratamento da ETE, contribuindo de forma efetiva para a redução dos gases de efeito estufa e contribui também para a diversificação da matriz energética nacional.

As barreiras e oportunidades para o aproveitamento do biogás de ETE se modificam conforme se modificam as condições econômicas, tecnológicas, sociais, políticas, legislação e outras condições que impactam a operação das ETEs. Desta forma, sugere-se que uma nova pesquisa seja realizada com as pessoas que planejam, desenvolvem ou aprovem projetos de investimento, para identificar quais são as barreiras que ainda continuam existindo e quais são as propostas de soluções para o crescimento e consolidação desta fonte distribuída, limpa e renovável de energia.

O resultado da pesquisa somente terá frutos se os interessados em promover o uso do biogás, e neste caso destacam-se as empresas de saneamento, a ABiogás e a sociedade organizada preocupada com a qualidade dos serviços prestados, com o meio ambiente e com o preço pago por estes serviços atuem para que barreiras sejam mitigadas e que oportunidades sejam desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Soluções ambientais: oportunidades na gestão de água, esgoto, drenagem e resíduos sólidos – uma proposta para reflexão e discussão**. Set 2013.

ABIOGÁS - Associação Brasileira de Biogás e Biometano. **Proposta de programa nacional do biogás e do biometano – PNBB**. Nov. 2015.

ABNT NBR - 9648. **Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro. ABNT, Nov. 1986.

ABNT NBR - 12.209. **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro. ABNT, Nov. 2011.

AMBIENT – **Biogás de ETE para geração de energia elétrica – Case da ETE Ribeirão Preto**. In: 6º ENCONTRO NACIONAL DAS ÁGUAS 2016. SÃO PAULO - SP. Abr. 2016. Disponível em <<http://www.abconsindcon.com.br/ena/edicao-ena?id=6&dia=1&sala=3&show=listar>>. Acesso em: 16/11/2016.

ANDREOLI, C. V et al. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final** - 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

AZEVEDO NETTO, J. M. **Aproveitamento do Gás de Esgoto**, apud revista DAE nº 41, 1961) – Tese (Prof. Catedrático) - na Faculdade de Higiene e Saúde Pública da Universidade de São Paulo - 1961.

AYRIMORAES, S.; **Atlas Brasil de despoluição de bacias hidrográficas - Tratamento de esgoto urbano** – In: ENCONTRO NACIONAL DAS ÁGUAS, 6. – São Paulo/SP – abril/2016.

BARROS, D. **Cogeração de Energia com biogás a partir de lodo biológico**. In: CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO MEIO RURAL, 10. USP – São Paulo. 11 a 13 de novembro de 2015.

CABRAL, C. B. G. **Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbicos tratando esgoto sanitário**, 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

CABRAL, C. B. G. et al. **Tecnologias de digestão anaeróbica com relevância para o Brasil / Probiogás**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Biogás e o mercado de crédito de carbono**. Nota Técnica VIII. São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=documentos>. Acesso em 28/08/2016

CHERNICHARO, C. A. L. **Estimativa de produção de biogás em ETES do Brasil**. In: WORKSHOP INTERNACIONAL, – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE ETES, 4. Curitiba – PR – 2016.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. **Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges**. Reviews In Environmental Science And Bio/technology, (s.l.), v. 14, n. 4, p.649-679 – 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283980170>. Acesso em 23/08/2016.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios** - 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

CHERNICHARO, C. A. L. et al. **Processos de tratamento de esgotos : guia do profissional em treinamento** : nível 2 / Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). – Brasília: Ministério das Cidades, 2008.

CNI – Confederação Nacional da Indústria – **Burocracia e Entraves ao Setor de Saneamento** – Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/cni/publicacoes-e-estatisticas/publicacoes/2016/1/11,1189/burocracia-e-entraves-ao-setor-de-saneamento.html>. Acesso em 04/10/2016.

COELHO, S. T. *et al.* Sewer Biogas Conversion Into Electricity –In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 11. Rio de Janeiro, RJ. 16 a 19 de agosto de 2006. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=publicacoes> – 2006. Acesso em 10/11/2016.

COELHO, S. T. **Projeto 27 - As perspectivas de contribuição do biometano para aumentar a oferta de GN**. In: WORKSHOP: O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO NO ESTADO DE SÃO PAULO — São Paulo – SP. 14/09/2016. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=noticia/resultados-do-workshop-sobre-contribuicao-do-biometano-para-aumentar-oferta-de-gas-natural> – Acesso em:10/11/2016

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 194 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities: Market Analysis and Lessons from the Field**. 57p. 2011.

EXTANTE - **Benefícios Econômicos da Expansão do Saneamento: Qualidade de vida, Produtividade e educação, Valorização ambiental**. 2014. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/estudos-trata-brasil>. Acesso em: 25/08/2016.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Potencial de Energia Renováveis: Volume II – Biomassa, resíduos e hidroeletricidade**. Belo Horizonte, MG. Abril - 2014.

FLORES, G. M. **Regulação do Biometano**. In: WORKSHOP ARSESP – BIOMETANO - São Paulo – SP, 13/09/2016. Disponível em: <<http://www.arsesp.sp.gov.br/SitePages/noticia-resumo.aspx?Identificacao=workshopbiogas2016>>. Acesso em 10/11/2016.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento** - Ministério da Saúde, – 4. ed. – Brasília. 2015.

GAIO, M. M., **Experiência da COPASA MG no aproveitamento energético do biogás na ETE Arrudas**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA DE SAÚDE PÚBLICA. 4. Belo Horizonte / MG – 18 a 22/03/2013. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/uploads/2013/05/Marcelo_Monachesi.pdf. Acesso em 10/11/2016

GBIO/IEE/USP – **Sumário Executivo**. In: WORKSHOP: A CONTRIBUIÇÃO DO BIOMETANO PARA AUMENTAR A OFERTA DE GÁS NATURAL EM SÃO PAULO – PROJETO 27. São Paulo – SP. 14/09/2016. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/gbio/sites/default/files/Relat%C3%B3rio%20Workshop%20Final.pdf>. Acesso em 20/11/2016.

GNESD - Global Network on Energy for Sustainable Development - **Biomass Resíduos as Energy Source to Improve Energy Access and Local Economic Activity in low HDI Region of Brazil and Colombia** – September 2015. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=node/47>. Acessado em 23/08/2016

GOLDEMBERG, J. et al; **Bioenergia no estado de São Paulo, situação atual, perspectivas, barreiras e propostas**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008.

GOMES, E. **Diretrizes para Net Metering em ETEs**. In: WORKSHOP INTERNACIONAL – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS – DE ETES, 4. Curitiba – PR – 2016.

GRANDIN, F. R. **Tecnologias de Tratamento de Esgoto – Um Breve Comparativo** – In: ASSEMBLÉIA NACIONAL DA ASSEMAE, 44. Uberlândia / MG - 04 a 09 de maio 2014.

GUERRA, A. C. S. et al. **Resumo Técnico**. In: WORKSHOP INTERNACIONAL – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS – DE ETES, 4. Curitiba – PR – 2016. Disponível em <http://www.cidades.gov.br/saneamento-cidades/probiogas/publicacoes>. Acesso em: 20/11/2016.

ICLEI - Brasil - **Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, efluentes urbanos**. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2010.

JENDER, O. et al. **Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil / Probiogás**. Brasília, DF.: Ministério das Cidades, 2016.

JESUS NETTO, J. P. **O Gás dos Esgotos** – Apud Revista DAE Nº1 – 1936 – Sabesp – Disponível em: <http://revistadae.com.br/site/acervo-historico/>. Acesso em 20/10/2016.

JORDÃO, E. P. **Tratamento de Esgotos Domésticos** / Eduardo Pacheco Jordão, Constantino Arruda Pessoa – 7. Ed. – Rio de Janeiro, 2014.

Lei 11.445/2007 – **Lei de Diretrizes Nacionais do Saneamento Básico**. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm > Acesso em 03/10/2016.

LOBATO, Livia C. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico**. 184p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - UFMG, 2011.

METCALF & EDDY. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5. Ed. Tradução de Ivanildo Hespanhol e José Carlos Mierzwa. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MIKI, M. K. **Dilemas do UASB**. Artigo técnico publicado na revista DAE/ maio-2010, SABESP. Disponível em: [/http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.052](http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.052). Acesso em 28/08/2016.

MOREIRA, H. C. **Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás – Avanços e oportunidades**. In: WORKSHOP INTERNACIONAL – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS – DE ETES, 4. Curitiba – PR – 2016.

MOTA, F. S. B.; Von Sperling, M. (Coord.). **Nutrientes de esgoto sanitário – Utilização e Remoção**. ed. 1. Rio de Janeiro – ABES - 2009.

NOVAK, A. C. et al. **Oportunidades da cadeia produtiva de biogás para o estado do Paraná**. / Senai, Curitiba/PR - 2016.

NUVOLARI, A. (Cord.). **Esgoto Sanitário – Coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola**. 2. Ed. São Paulo: Bluchner, 2011.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP–Estudo de Caso**. 152 p. Dissertação (Mestrado Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia PIPGE / IEE da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

PDE 2024 – **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2015.

PERLINGEIRO, C. A. G. (Ed.) **Biocombustíveis no Brasil, Fundamentos Aplicações e Perspectivas**. 1. ed. – Rio de Janeiro 2014.

PLANSAB – **Plano Nacional de Saneamento Básico**. Ministério das Cidades – Brasília, 2014.

PLATZER, C. **A utilização de biogás em ETE no Brasil é viável? O potencial de aproveitamento na realidade brasileira**. In: 7º ENCONTRO TÉCNICO CASAN – SC -JUNHO/2016. Disponível em: <http://www.casan.com.br/>. Acesso em: 11/11/2016.

POSSETTI, G. R. C. **Iniciativas de Inovação e pesquisa da SANEPAR: Recuperação Energética de Subprodutos de ETES**. In: WORKSHOP INTERNACIONAL – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS – DE ETES, 4. Curitiba – PR – 2016

POSSETTI, G. R. C et al. **Software ProBio 1.0 - Programa de estimativa de produção de biogás em reatores UASB**. 2015. Sw disponível em www.sanepar.com.br, www.desa.ufmg.br/software.html

PROSAB - **Programa de Pesquisa em saneamento básico**. Pós- tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte: PROSAB, 2014.

ROSHSTOFFE, F. N. (Edit.); ZATTAR, M. M. (Trad.) **Guia Prático do Biogás – Geração e Utilização** - 5. Ed.- Gulzow – 2010 – Acesso em 27/08/2016 em <http://www.cidades.gov.br/saneamento-cidades/probiogas/publicacoes/publicacoes-do-probiogas-2>

ROSENFELDT, S. et al. **Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs a partir do biogás / Probiogás**. Brasília, DF.: Ministério das Cidades, 2016.

SABESP. **Chamada Pública – Minuta do Edital 01-07-16** - Concorrência Internacional Sabesp – Prestação de serviços- exploração do potencial energético através do uso do biogás e do lodo provenientes das instalações da ETE Barueri – SP. EE ver.26 29/junho/2016. Acessada em 10/8/2016 em <http://site.sabesp.com.br/site/consultatecnica/consultatecnica.html>

SERFASS, P. **-American Biogás Concill - State of the U.S. Biogas Industry**, 2011. Disponível em: <http://americanbiogascouncil.org/pdf/ABC-StateoftheInd-BiocyclePolicyPres.pdf>. Acesso em 27/10/2016.

SILVA, T. C. F. - **Utilização de Biogás de Estações de Tratamento de Esgoto para Fins Energéticos**. 152p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SILVEIRA, B. et al. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás** 1. Ed. - Brasília, DF.: Ministério das Cidades, 2015.

SILVEIRA, B. – **Apresentação em ppt - Acompanhamento da Medição na ETE Piçarrão – Desafios e Oportunidades** – Projeto Probiogás - 2015

SOARES, C. **Microturbines – Applications for distributed energy systems**. California – USA: Elsevier, 2007.

SOBRINHO, P. A. **Reatores UASB – A experiência brasileira**. In: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre/RGS. 2011. Acessado em 15/11/2016. Disponível em <http://www.abes.locaweb.com.br/XP/XP-EasyPortal/Site/XP-PortalPaginaShow.php?id=652&min=0>

SVENSON, M. et al. **IEA Bioenergy Task 37 - Country Reports Summary 2015-** Published by IEA Bioenergy – 2016.

TAKAHASHI, R. **Licitação de uma planta de biogás: Avanços e Desafios. SEMAE** – In: WORKSHOP INTERNACIONAL – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS – DE ETES, 4. Curitiba – PR – 2016.

THIEME, E. et al. **Catálogos de Tecnologias e Empresas de Biogás / Probiogás**. 1. Ed. Ministério das Cidades – Brasília, 2015.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica** – EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TOLMASQUIM, M. T. **Novo modelo do setor elétrico brasileiro**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Synergia; EPE: Brasília, 2015.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

VALENTE, V. B. **Financiamento para Aproveitamento Energético de Biogás: Desafios e recomendações do ponto de vista de um banco**. KFW Banco de Desenvolvimento / abril 2016. In: WORKSHOP INTERNACIONAL – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS – DE ETES, 4. Curitiba – PR – 2016.

VILLANI, W. et al. – **Estudo técnico de viabilidade para implantar a cogeração de energia a partir do biogás e do lodo proveniente dos reatores anaeróbios da ETE Rio Preto da SEMAE** – 2011. Disponível em <http://www.solutionsforwater.org> - Acesso em 9/11/2016.

VON SPERLING, M. E. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: V. 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. Ed. – Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil** /. 97 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZAIAT, M. **Aplicação do conceito de biorrefinaria a estações de tratamento biológico de águas residuárias: o controle da poluição ambiental aliado à recuperação de matéria e energia**. Escola de Engenharia de São Carlos / USP. 2016. Disponível em <http://www.bv.fapesp.br/pt/auxilios/93431/aplicacao-do-conceito-de-biorrefinaria-a-estacoes-de-tratamento-biologico-de-aguas-residuarias-oc/> Acesso em 5/11/2016.

ZUFFO, C. **Energias renováveis aplicadas ao saneamento**. In: ENCONTRO TÉCNICO DA AESABESP - São Paulo - SP. 7/8/2012. Disponível em: http://www.evolvedoc.com.br/aesabesp/detalhes-336_energias-renovaveis-aplicadas-ao-saneamento. Acesso: 10/11/2016

ZUFFO, C. **Inovação no Saneamento**. Artigo - Revista Saneas nº 58 de abril-julho/2016a.

ZUFFO, C. **A importância do gás de ETE no contexto do saneamento**. In: WORKSHOP: A CONTRIBUIÇÃO DO BIOMETANO PARA AUMENTAR A OFERTA DE GÁS NATURAL EM SÃO PAULO – PROJETO 27 – GBIO/IEE/USP - São Paulo – SP. 14/09/2016b

WILLIS, J. et al. **Barriers to Biogas Use for Renewable Energy** – Water Environment Research Foundation, 2012

WISER, R. W. et al. **Evaluation of Combined Heat and power Technologies for Wastewater Treatment Facilities**. Prepared by Brown and Calwell for Columbus Water Works, Columbus, Georgia – September 25, 2012

APÊNDICE A – ESGOTAMENTO SANITÁRIO

1. Classificação de sistemas de esgoto

Encontra-se em Funasa (2015) que sistemas coletivos de esgotos sanitários poderão ser concebidos e projetados conforme a classificação: unitário, misto e separador absoluto, sendo que o sistema separador absoluto é o único permitido no Brasil.

O sistema unitário consiste na coleta e transporte das águas pluviais dos esgotos domésticos, dos eventuais despejos industriais e das águas de infiltração numa única rede de canalizações. No Brasil, o uso deste sistema unitário não é permitido, entretanto na Europa, na Ásia e na América do Norte, onde o índice pluviométrico geralmente é inferior a um terço da média brasileira, o uso do sistema unitário ainda é comum, pois apresenta como vantagem a construção de uma só tubulação.

No sistema misto a rede é projetada para receber o esgoto sanitário e mais uma parcela das águas pluviais. A coleta dessa parcela varia de um país para outro. Sistema não permitido no Brasil, do mesmo modo que o sistema unitário.

O sistema separador absoluto, conforme Nuvolari (2011) é o sistema de esgoto adotado no Brasil desde 1912, de forma que não admite coletar outras águas que não o esgoto sanitário; é o único sistema aplicável por exigência da legislação ambiental (Figura A1).

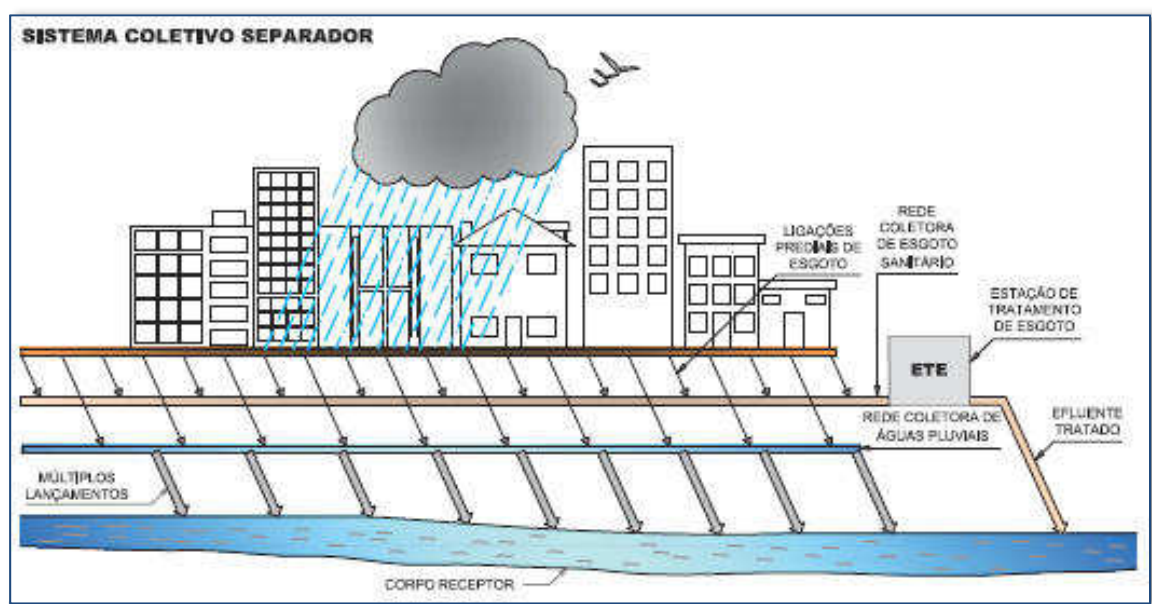


Figura A1 - Sistema Coletivo Separador.

Fonte: Funasa, (2015)

A norma brasileira NBR 9648 ABNT (1986) define o sistema separador como o “conjunto de condutos, instalações e equipamentos destinados a coletar, transportar, condicionar e encaminhar, somente o esgoto sanitário a uma disposição final conveniente, de modo contínuo e higienicamente seguro”.

As ligações prediais à rede de esgoto e rede coletora de águas pluviais devem ser separadas, como mostra a Figura A2.

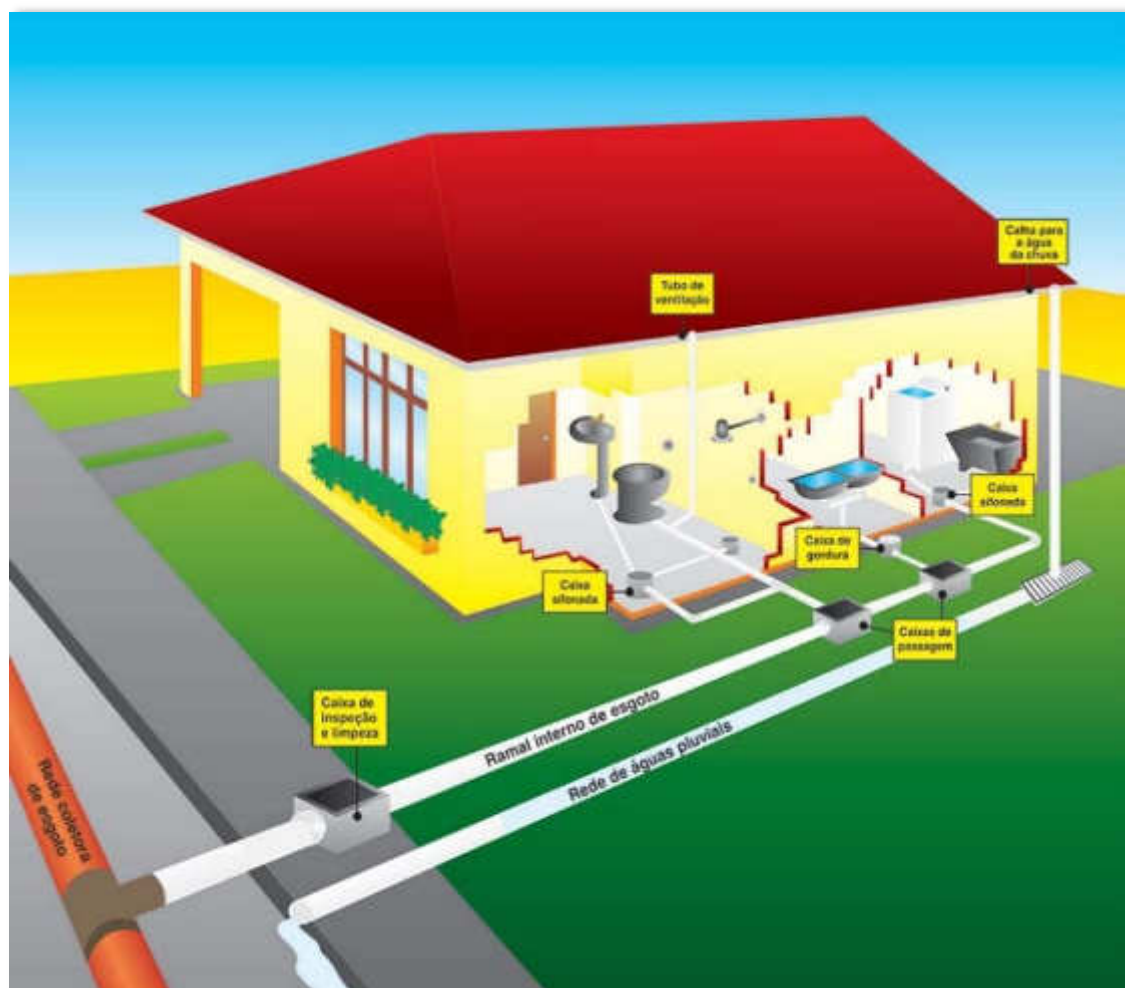


Figura A2. – Separação Rede esgoto e rede fluvial.
Fonte: <http://www.aguasdesaofrancisco.com.br/esgoto/>

O custo de sua implantação do sistema de esgoto separador é bastante reduzido, em virtude das seguintes razões:

- As águas pluviais não oferecem o mesmo perigo que o esgoto doméstico, podendo ser encaminhadas diretamente aos corpos receptores (rios, lagos e outros) sem tratamento; este será projetado apenas para o esgoto doméstico;

- Nem todas as ruas de uma cidade necessitam de rede de drenagem pluvial. De acordo com a declividade das ruas, a própria sarjeta se encarregará do escoamento, reduzindo assim, a extensão da rede pluvial;
- O esgoto doméstico deve ter prioridade por representar um problema de saúde pública. O diâmetro dos coletores é reduzido, sendo estes de fabricação industrial e mais baratos;
- A ausência de águas pluviais permite a redução das dimensões das unidades de tratamento dos esgotos sanitários.

2. Composição do esgoto e necessidade de tratamentos

Conforme Von Sperling (2014) o esgoto doméstico é composto aproximadamente de 99,9 % de água e 0,1 % de sólidos; portanto é devido a esta fração de 0,1% de sólidos que há necessidade de se tratar os esgotos.

Os sólidos podem ser classificados como compostos sólidos voláteis (matéria orgânica) e sólidos fixos (matéria inorgânica) e ambos podem estar suspensos ou dissolvidos, cuja composição típica é conforme Tabela A1.

Tabela A1 - Distribuição típica dos sólidos do esgoto bruto.

DISTRIBUIÇÃO TÍPICA DOS SÓLIDOS DO ESGOTO BRUTO			
SÓLIDOS TOTAIS = 1000 mg/l			
Sólidos Suspensos Totais = 350 mg/l (SS ou SST)		Sólidos Dissolvidos Totais = 650 mg/l (SD ou SDT)	
Sól. Susp. Voláteis (SSV)	Sól. Susp. Fixos (SSF)	Sól. Diss. Voláteis (SDV)	Sól. Diss. Fixos (SDF)
300	50	250	400

Fonte: Von Sperling (2014)

Pode-se observar em Jordão (2014) que os sólidos no esgoto de origem orgânica, são compostos de proteínas (40 a 60%); carboidratos (25 a 50%); gordura e óleos (10%) e uréia, surfatantes, fenóis e pesticidas. A matéria inorgânica contida nos esgotos é formada principalmente por areia e por minerais dissolvidos.

Em Funasa (2015) tem-se que nos sólidos proliferam microorganismos, podendo ocorrer organismos patogênicos dependendo da saúde da população que gerou o esgoto. A Tabela 2.4 apresenta uma visão geral dos poluentes presentes no esgoto, seus parâmetros e efeitos/consequências, o que mostra que é necessário o

tratamento do esgoto bruto em ETE - estações de tratamento de esgoto para mitigar tais efeitos e consequências. Atender à legislação ambiental, antes de lançar o esgoto tratado (efluente) no corpo receptor, é fundamental para a saúde da população, preservação do meio ambiente além dos benefícios econômicos advindos de um ambiente limpo.

É grande o número de doenças relacionadas com o destino inadequado dos dejetos humanos. Citam-se entre as principais: ancilostomíase, ascaridíase, amebíase, cólera, diarreia infecciosa, disenteria bacilar, esquistossomose, strongiloidíase, febre tifoide, febre paratifoide, salmonelose, teníase e cisticercose.

3. Quantificação da matéria orgânica presente no esgoto sanitário

Apresenta-se em Von Sperling (2014) que a matéria orgânica contida nos esgotos é uma característica de suma importância, que causa o principal problema de poluição para os corpos d'água: o consumo de oxigênio dissolvido (OD) pelos microorganismos nos seus processos metabólicos de utilização e estabilização da matéria orgânica; por outro lado é a matéria orgânica presente no esgoto que possibilitará a geração do biogás pelos microorganismos, no processo anaeróbico.

Em geral não é necessário caracterizar a matéria orgânica em termos de proteínas, gorduras, carboidratos, etc); adicionalmente há uma grande dificuldade na determinação laboratorial dos diversos componentes da matéria orgânica nos esgotos, de forma que a quantificação da matéria orgânica presente nos esgotos é usualmente realizada de forma indireta, através das análises laboratoriais da DBO e DQO.

A determinação em laboratório da DBO para a estabilização completa da matéria orgânica demora, em termos práticos, cerca de 20 dias ou mais para esgotos domésticos. Tal determinação completa é chamada de DBO_u (DBO última). Para evitar que o teste em laboratório demorasse muito, e para possibilitar a comparação de diversos resultados, padronizou-se que a análise seria realizada no 5º dia e que a análise fosse a 20°C; tal DBO é denominada DBO padrão ou DBO₅. Quando não explicitado se é DBO_u, ou seja, utilizado somente a sigla DBO, entende-se que é DBO₅.

Verifica-se em Chernicharo et al. (2008) que a DBO retrata a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar, através de processos bioquímicos, a matéria orgânica. A DQO mede o consumo de oxigênio ocorrido em função da oxidação química da matéria orgânica.

Aa faixas típicas de valores no esgoto bruto para DBO e DQO são: DBO = 250 - 400 mg/l e DQO = 450 - 800 mg/l.

A relação DQO/DBO indica a biodegradabilidade do esgoto. No esgoto doméstico bruto, a relação DQO/DBO varia em torno de 1,7 a 2,4. No esgoto tratado, como a maior parte da fração biodegradável da matéria orgânica é removida na estação de tratamento, a relação DQO/DBO é maior que no esgoto bruto. Quanto maior a eficiência do tratamento, maior o valor da relação DQO/DBO. Os valores típicos da relação DQO/DBO nos esgotos tratados são usualmente superiores a 2,5, podendo chegar a 4,0 ou 5,0.

A DBO e a DQO são utilizadas, no monitoramento e na avaliação do desempenho das unidades da ETE, bem como na verificação de atendimento do efluente final aos padrões ambientais de lançamento.

A título de referência observa-se em Von Sperling (2014) os seguintes valores de DQO5 em função das características de um curso d'água.

Tabela A2 – Características de um curso d'água.

Condição do rio	DBO5 do rio (mg/l)
• Bastante limpo	1
• Limpo	2
• Razoavelmente limpo	3
• Duvidoso	5
• Ruim	>10

Fonte: Von Sperling (2014)

Nota: A resolução CONAMA 357/2005 trata dos valores máximos permitidos para lançamento de esgoto em água doce, os quais podem ser elevados caso o estudo da capacidade de autodepuração do corpo receptor demonstre que as concentrações mínimas de oxigênio dissolvido (OD) previstas na legislação não serão desobedecidas, nas condições de vazão de referência com exceção da zona de mistura. Naturalmente além das resoluções CONAMA, deve ser atendido as regulamentações estaduais e regionais.

APÊNDICE B – PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

É comum classificar as instalações de tratamento em função do grau de remoção de sólidos em suspensão e da demanda bioquímica ou química de oxigênio proveniente da eficiência de uma ou mais unidades de tratamento, sendo usual a seguinte denominação para as instalações:

- a) Tratamento Preliminar,
- b) Tratamento Primário,
- c) Tratamento Secundário
- d) Tratamento Terciário.

a) Tratamento Preliminar

O tratamento preliminar emprega principalmente processo físico e tem o objetivo de remover do esgoto os sólidos grosseiros e areia. A remoção dos sólidos grosseiros é feita frequentemente por meio de grades, que podem ser grossas médias e finas, dependendo do espaçamento entre as barras, mas pode também ser feita por meio de peneiras rotativas, estáticas ou trituradores. O mecanismo de remoção da areia é o de sedimentação realizada em unidades denominadas desarenadoras ou caixa de areia: a areia, devido às suas maiores dimensões e densidade, vai para o fundo do tanque, enquanto a matéria orgânica, sendo de sedimentação bem mais lenta, permanece em suspensão, seguindo para as unidades a jusante.

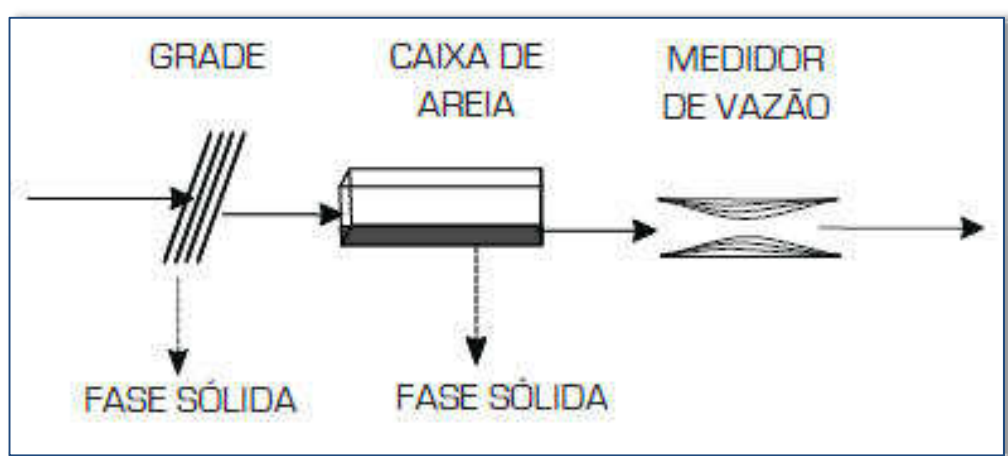


Figura B1 - Tratamento Preliminar
Fonte: Von Sperling (2014)

No tratamento preliminar, além das grades e dos desarenadores, inclui-se também uma unidade para a medição da vazão, a calha Parshall.

b) Tratamento Primário

Após o tratamento preliminar, o esgoto ainda contém sólidos flutuantes e sólidos em suspensão sedimentáveis de porte pequeno cuja remoção pode ser feita em unidades de sedimentação, reduzindo a quantidade de matéria orgânica contida no esgoto.

Os sólidos sedimentáveis e flutuantes são retirados por meio de mecanismos físicos, via decantadores. Empregam-se equipamentos com tempos de retenção maiores do que nos empregados no tratamento preliminar.

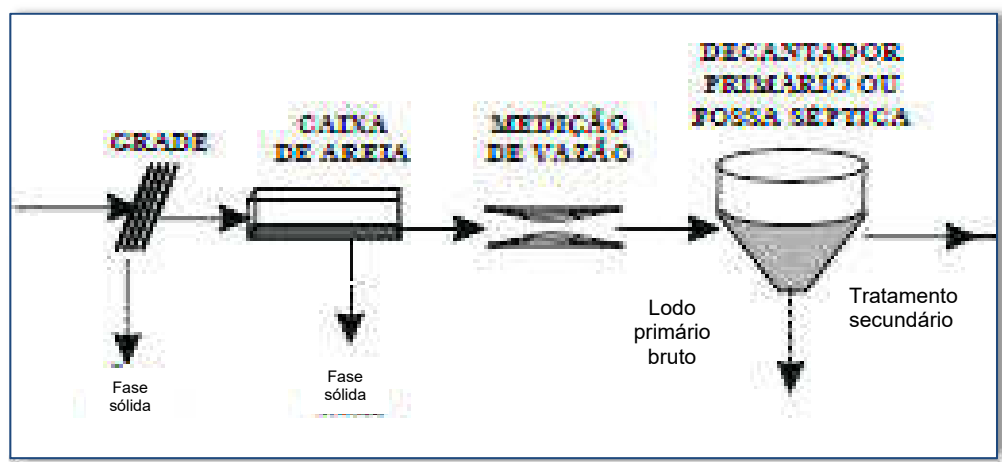


Figura B2 – Tratamento Primário
Fonte: Von Sperling (2014)

Conforme Chernicharo (2008) o esgoto flui vagarosamente pelos decantadores, permitindo que os sólidos em suspensão de maior densidade sedimentem gradualmente no fundo, formando o lodo primário bruto. Os materiais flutuantes como graxas e óleos, de menor densidade, são removidos na superfície, onde são coletados e removidos do tanque para posterior tratamento. Uma parte dos sólidos em suspensão corresponde à matéria orgânica em suspensão, o que contribui para que a carga orgânica que segue para o tratamento secundário seja reduzida. A eliminação média da DBO, nesta fase, é cerca de 25 a 35%.

c) Tratamento Secundário

É a etapa da remoção biológica dos poluentes e sua eficiência permite produzir um efluente em conformidade com o padrão de lançamento previsto na legislação ambiental.

Tem-se em Von Sperling (2014) que o principal objetivo do tratamento secundário é a remoção da matéria orgânica que se apresenta nas seguintes formas:

- *matéria orgânica dissolvida* (DBO solúvel ou filtrada), a qual não é removida por processos meramente físicos, como o de sedimentação, que ocorre no tratamento primário.

- *matéria orgânica em suspensão* (DBO suspensa ou particulada), a qual é em grande parte removida no eventual tratamento primário, mas cujos sólidos de sedimentabilidade mais lenta ainda persistem na massa líquida.

Os tratamentos biológicos podem ser classificados em: *aeróbios*, quando se utiliza microrganismos que necessitam continuamente de oxigênio dissolvido, *anaeróbios*, quando se utiliza microrganismos que crescem na ausência de oxigênio e *facultativos*, quando se utiliza microrganismos que podem atuar nas duas condições.

Estes tipos de tratamento oferecem uma excelente remoção da matéria orgânica, assim como redução dos microrganismos patogênicos. Nesta fase a redução da DBO deve alcançar 90% ou mais, dependendo do tipo de tratamento utilizado.

Conforme Von Sperling (2008) o tratamento secundário inclui as unidades de tratamento preliminar, mas pode ou não incluir as unidades do tratamento primário exclusivas; Há uma grande variedade de sistemas de tratamento secundário, os quais podem ser aplicados isoladamente ou combinados com outros sistemas, sendo que os mais comuns são:

- Lagoas de estabilização e variantes
- Lodos ativados e variantes
- Reatores anaeróbicos de fluxo ascendente (UASB/RAFA)
- Reatores aeróbicos com biofilmes
- Processos de disposição sobre o solo
- Sistemas alagados construídos (wetlands)

Apresenta-se abaixo um breve descritivo dos principais sistemas de grande escala utilizados no tratamento de esgoto sanitário:

- c.1) lagoas de estabilização,
- c.2) lodos ativados e variantes
- c.3) reatores anaeróbicos UASB

c.1) Lagoas de estabilização

Geralmente o esgoto do tratamento preliminar entra pela parte superior da lagoa, numa das bordas e sai pela borda oposta, também pela parte superior, o que faz da lagoa um simples tanque de decantação, com digestão dos sólidos na parte inferior.

Há diversas variantes do sistema de lagoas (lagoas aeróbias, lagoas anaeróbicas, lagoas facultativas, etc) que são utilizadas isoladas ou em combinação com outros sistemas para se obter o tratamento desejado, com diferentes necessidades de espaço, intensidade energética, grau de mecanização, outros

Conforme Chernicharo et al. (2008), de maneira geral, os sistemas de tratamento com lagoas apresentam uma eficiência da ordem de 75 a 85% de remoção da carga orgânica (DBO).

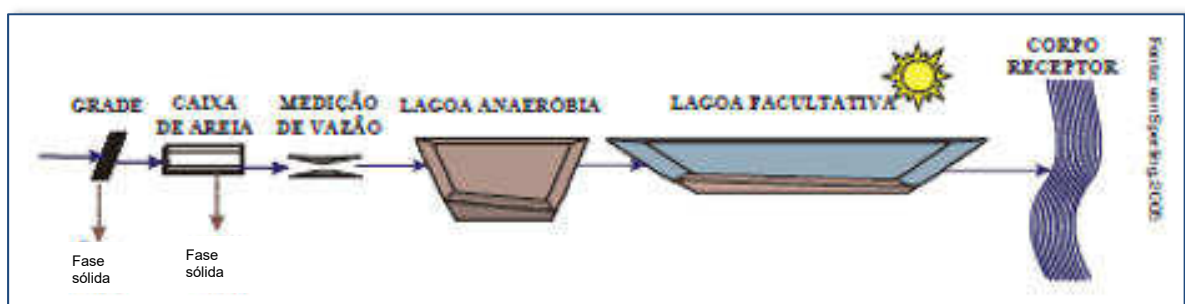


Figura B3 – Lagoa anaeróbica + lagoa facultativa
Fonte: Von Sperling (2014)

Os sistemas de lagoas, apesar de produzirem biogás com as lagoas anaeróbicas e lagoas facultativas, a produção do biogás é pequena e há diversas dificuldades práticas em se coletar o biogás; atualmente não é viável a produção de energia com o aproveitamento do biogás com estes processos.

c.2) Lodos ativados e variantes.

Conforme Jordão (2014), lodo ativado é o floco produzido num esgoto bruto ou decantado pelo crescimento de bactérias ou outros organismos, na presença de oxigênio dissolvido, e acumulado em concentração suficiente graças ao retorno de outros flocos previamente formados.

O sistema de lodos ativados é um sistema aeróbico e é formado por:

- 1) tanque de aeração (reator aerado) onde é feito a digestão aeróbica da matéria orgânica,
- 2) pelo decantador secundário,
- 3) pela elevatória de circulação de lodo do decantador e

4) pela retirada do lodo biológico excedente secundário (Figura B4).

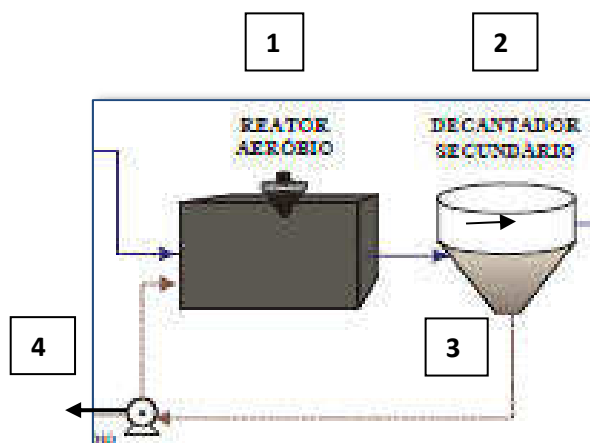


Figura B4 – Lodos Ativados

Fonte: Von Sperling (2014)

No tanque de aeração (1), devido à entrada contínua de alimento, na forma de DBO, dos esgotos, as bactérias crescem e se reproduzem continuamente. Caso fosse permitido que a população de bactérias crescesse indefinidamente, elas tenderiam a atingir concentrações excessivas no tanque de aeração, dificultando a transferência de oxigênio a todas as células. Além disso, o decantador secundário ficaria sobrecarregado, e os sólidos não teriam mais condições de sedimentar satisfatoriamente, vindo a sair com o efluente final, deteriorando a sua qualidade. Para manter o sistema em equilíbrio, é necessário que se retire aproximadamente a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por reprodução. Esse é, portanto, o lodo biológico excedente, que pode ser extraído diretamente do reator ou da linha de recirculação.

Há diversas variantes de sistema de lodos ativados:

- Lodos ativado convencional (fluxo contínuo),
- Lodos ativado aeração prolongada,
- Lodos ativados de fluxo intermitente (batelada),
- Lodos ativados como pós tratamento de efluentes anaeróbicos,
- Lodo ativado com leito móvel (MBBR – moving bed biofilm reactor),
- Lodos ativados com membranas (MBR – membrane bioreactors),

sendo que somente o sistema de “lodos ativados convencional” engloba reatores anaeróbicos para o tratamento do lodo primário e secundário, o que gera biogás, e que será descrito brevemente a seguir.

O sistema de lodos ativados convencional engloba duas fases: fase líquida e fase sólida. A fase sólida refere-se à estabilização do lodo primário e secundário através de reatores anaeróbicos, os quais geram biogás; Figura B5 apresenta a fase líquida e a fase sólida do sistema de lodos ativados convencional.

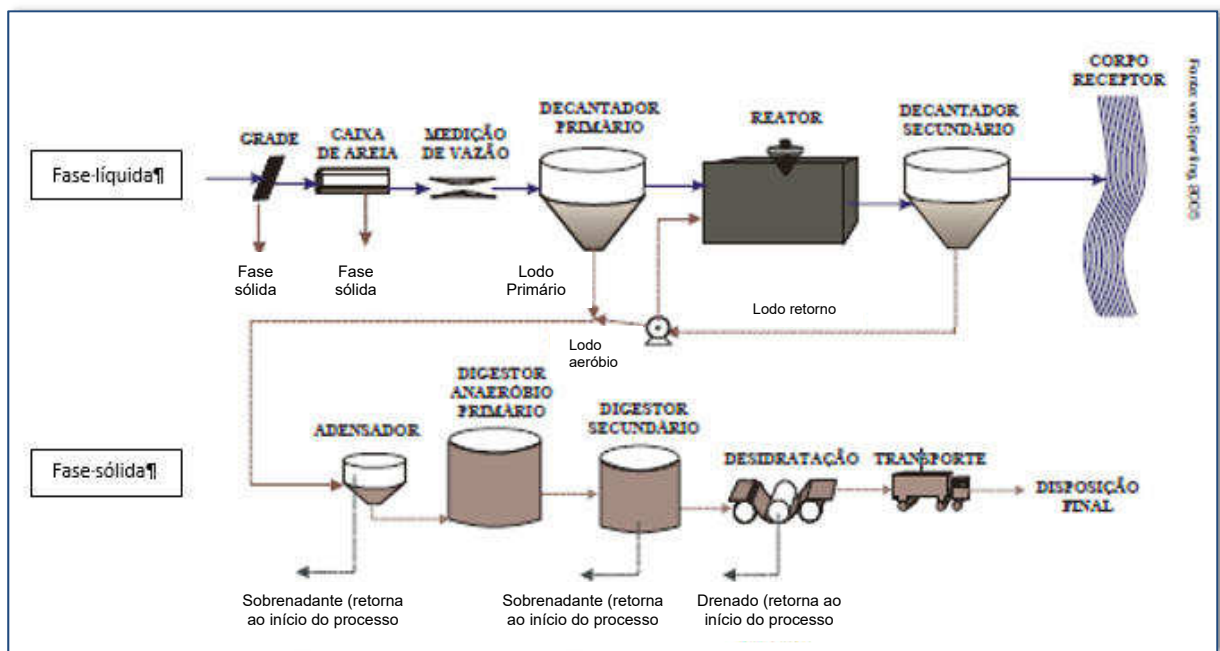


Figura B5 – Lodo ativado convencional, com estabilização de lodo por reatores anaeróbicos de lodo, com geração de biogás.

Fonte: Von Sperling (2014)

Como exemplo de ETEs que utilizam o sistema de lodos ativados convencional temos as estações metropolitanas da Sabesp (ABC, Barueri, Parque Novo Mundo, São Miguel e Suzano), as quais são apresentadas no site da Sabesp:

<http://site.sabesp.com.br/site/saneamento/esgoto.aspx?secaold=48>

c.3) Reatores Anaeróbico de Fluxo Ascendente (RAFA ou em Inglês UASB)

Para o tratamento de esgoto sanitário, a biodigestão anaeróbia representa importante papel, pois além de permitir a redução significativa do potencial poluidor, permite a recuperação da energia na forma de biogás.

Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente (RAFA) ou em inglês UASB (upflow anaerobic sludge blanket), são equipamentos utilizados para digestão de matérias orgânicas. O esgoto afluyente entra no reator continuamente por meio de um sistema de distribuição no fundo do reator e passa em fluxo ascendente pelo leito de manta de lodo, onde ocorre a digestão anaeróbia, favorecida pelo contato e mistura intensiva do substrato (esgoto sanitário com a matéria orgânica) com a biomassa (lodo).

Cabe ressaltar que existem variações destes reatores, sobretudo quanto às suas características construtivas. Neste sentido, têm-se, por exemplo, os reatores anaeróbicos de leito fluidizado (RALF), os quais são amplamente utilizados no estado do Paraná.

Observa-se em Silveira et al. (2015) que o reator anaeróbico reúne as funções de decantador primário, reator biológico, decantador secundário e digestor de biomassa formada (lodo), comparando com o processo de lodo ativado convencional. A Figura B6 apresenta um esquema típico de utilização do reator UASB.

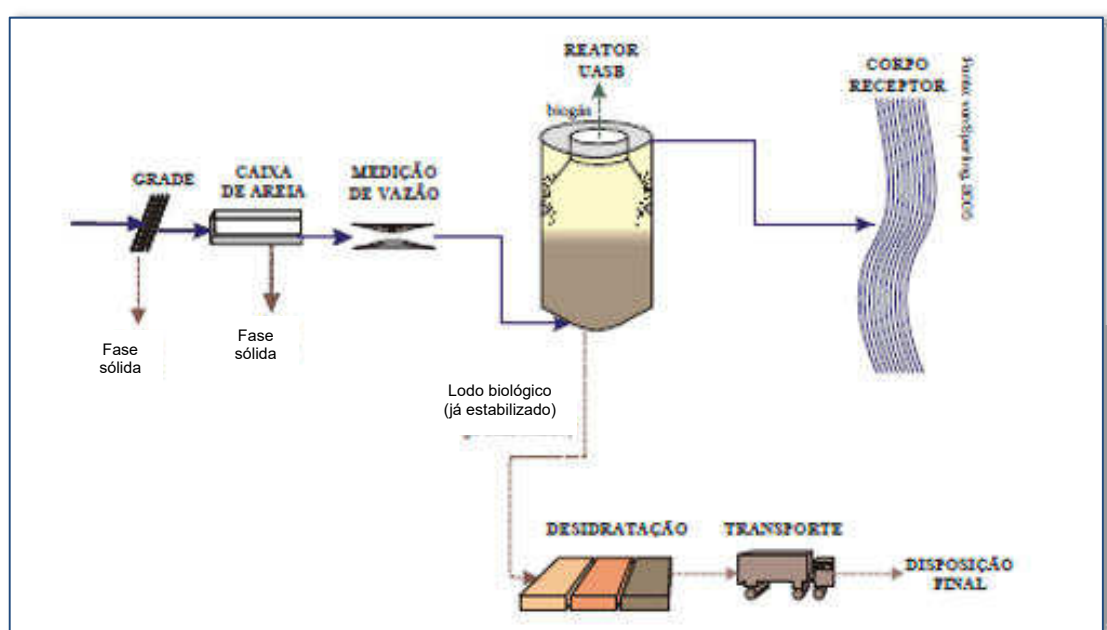


Figura B6 – Reator UASB.
Fonte: Von Sperling (2014)

Tem-se em Chernicharo et al. (2008) que os reatores UASB dificilmente produzem efluentes que atendem aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental. Diante desse fato, torna-se de grande importância o pós-tratamento dos efluentes dos reatores UASB, como uma forma de adequar o efluente tratado aos requisitos da legislação ambiental e propiciar a proteção dos cursos d'água. Praticamente todos os processos de tratamento de esgotos podem ser usados como pós-tratamento dos efluentes do reator UASB.

Um exemplo de utilização do reator UASB com pós-tratamento é mostrado na Figura B7, onde é utilizado o sistema de lodo ativado como pós-tratamento.

As principais vantagens dessa configuração, comparada com a concepção tradicional do sistema de lodos ativados convencional, são:

- Redução na produção de lodo.
- Redução no consumo de energia.
- Redução no consumo de produtos químicos para desidratação.
- Menor número de unidades diferentes a serem implementadas.
- Menor necessidade de equipamentos.
- Maior simplicidade operacional

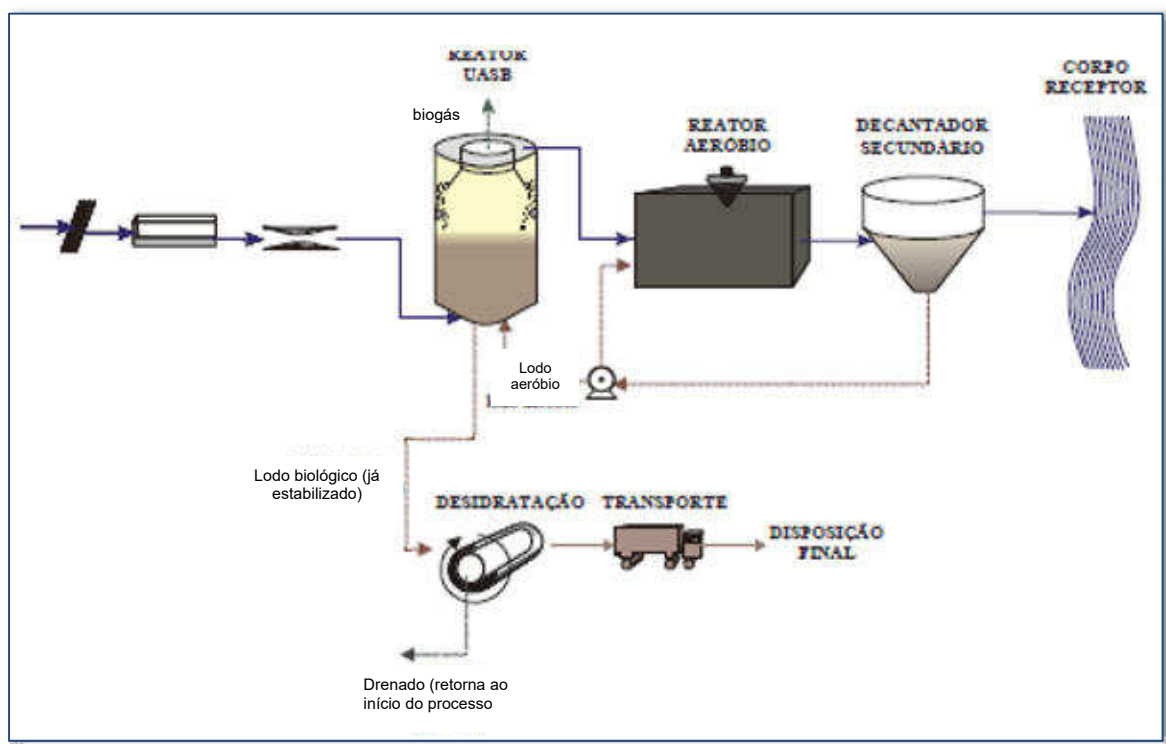


Figura B7 - Reator UASB, com pos-tratamento utilizando o sistema de lodo ativado.

Fonte: Von Sperling (2014)

Como exemplo de ETE que utiliza o sistema de lodo ativado como pós-tratamento tem-se a ETE de Piçarrão da empresa de saneamento Sanasa, de Campinas – SP. Grandin (2014).

d) Tratamento Terciário

Conforme Von Sperling (2014), o tratamento terciário é aplicado eventualmente e objetiva remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis) ou ainda, a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário, tais como:

- Nutrientes (Nitrogênio, Fosforo)
- Organismos patogênicos
- Compostos não biodegradáveis
- Metais pesados
- Sólidos inorgânicos dissolvidos
- Sólidos em suspensão remanescentes

APÊNDICE C – GERENCIAMENTO DE LODO

O lodo residual do processo de tratamento de esgoto é considerado um resíduo semissólido que requer disposição final adequada, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS - (Lei Nº 12.305/2010).

Com a aprovação da Lei Nº 12.305/2010, a partir de 2014, apenas a parte não aproveitável dos resíduos (rejeitos) pode ser encaminhada para aterros sanitários. Isso significa que o lodo das ETEs que atualmente são enviados para aterro sanitário na sua maioria, precisará ser submetido a todos os processos possíveis de tratamento e recuperação por meio das tecnologias disponíveis e economicamente viáveis, antes de serem depositados num aterro sanitário.

O lodo representa, juntamente com eletricidade, um custo operacional significativo para as prestadoras de serviço de saneamento, principalmente devido aos custos de transporte e disposição final, variando de 20 a 60% do custo operacional total de uma ETE.

O gerenciamento do lodo normalmente inclui as seguintes etapas: Andreoli et al. (2014)

- Adensamento: remoção de umidade (redução de volume)
- Estabilização: remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)
- Condicionamento: preparação para a desidratação (principalmente mecânica)
- Desaguamento: remoção de umidade (redução de volume)
- Higienização: remoção de organismos patogênicos
- Disposição final: destinação final dos subprodutos

A Tabela C1 apresenta, de forma resumida, as principais tendências da gestão de biossólidos nos países desenvolvidos. Andreoli et al. (2014), as quais no Brasil tendem a serem seguidas ou até serem mais restritivas quando tratar-se de impacto ambiental.

Apesar da viabilidade econômica e disponibilidade tecnológica serem critérios que variam muito caso a caso, o envio de lodos para aterros já começa a ser considerado impeditivo em alguns municípios conforme a lei citada acima. Nos outros casos, a lei tem causado um aumento expressivo do custo da disposição final.

Tabela C1 – Tendências do gerenciamento de biossólidos nos Estados Unidos e Europa.

It	Processos	x	Estados Unidos	x	Europa
1	Produção de lodo		Crescente		Crescente
2	Processos mais eficazes de secagem		Crescente		Crescente
3	Processos mais avançados de beneficiamento e higienização		Crescente		Crescente
4	Reciclagem do lodo		Crescente		Crescente
5	Disposição em aterros		Decrescente		Decrescente
6	Incinerização		Decrescente		Crescente
7	Disposição oceânica		Banida		Decrescente
8	Exigências legais		Crescente		Crescente
9	Níveis de metais no biossólido		Decrescente		Decrescente
10	Eficiência energética e recuperação de energia		Crescente		Crescente
11	Terceirização na gestão de biossólidos		Crescente		Crescente
12	Custo na gestão de biossólidos		Crescente		Crescente
13	Exigências da sociedade em relação às condições ambientais		Crescente		Crescente
14	Exigência dos agricultores em relação à qualidade dos biossólidos		Crescente		Crescente

Fonte: Andreoli et al. (2014)

Segundo Jordão (2014) há diversas soluções para a disposição final do lodo: 1-Aterro sanitário; Incineração; 2-Usos agrícolas (uso no solo com fins agrícolas; aplicação em área de florestamento; produção de composto ou fertilizantes organo-mineral; restauração de terras); 3-Reuso industrial (produção de agregados leves para a construção civil; incorporação de lodo à fabricação de cimento e de produtos cerâmicos); 4-Lançamento no oceano; 5- Outros.

Segundo ABES (2013) o uso agrícola do lodo de ETE é uma solução com enorme potencial de aplicação e largamente adotada nos países desenvolvidos. Infelizmente no Brasil a legislação é absurdamente restritiva e enfrenta-se o conservadorismo dos órgãos ambientais pelo tabu que a disposição no solo representa. Não obstante algumas concessionárias vêm pesquisando a aplicação do lodo de ETE como composto fertilizante, a exemplo da Sanepar/PR e Sabesp/SP; espera-se que seja desenvolvido uma tecnologia que possa atender aos requisitos ambientais, já que seria encontrado uma solução sustentável para o problema de destinação final adequada do lodo de ETE.

Conforme Sobrinho (2009) “a Resolução nº 375 de 2006 do Conama - (Conselho Nacional do Meio Ambiente) determina que cada lote de lodo deve ser caracterizado de acordo com aspectos de potencial agrônomo; de substâncias

inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas; de indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos e de estabilidade. O número total de parâmetros a serem determinados é de 62, incluindo os teores de dioxinas, furanos e vírus entéricos. No Brasil, há poucos laboratórios que possuem capacidade para realizar estas determinações dentro dos limites recomendados pela norma e com grau de incerteza aceitável. Além da caracterização, deve-se fazer o monitoramento do lodo e do solo onde ele foi aplicado, resultando na obrigação de realização de mais algumas análises. De qualquer forma, mereça destaque o esforço que a Sanepar / PR e a Sabesp/SP fazendo para desenvolver pesquisa para o uso agrícola do lodo de ETE”.

Neste contexto as empresas prestadoras de serviços estão procurando desenvolver soluções para reduzir o impacto ambiental do lodo, sendo uma delas o aproveitamento energético do biogás e do próprio lodo seco.

Um exemplo é o estudo da COPASA para implantar uma “Central de Lodo” na qual queima em caldeira o biogás, o lodo próprio de ETE e o lodo recebido de outras ETEs menores para gerar eletricidade, conforme mostra a Figura C1 - Gaio (2013).

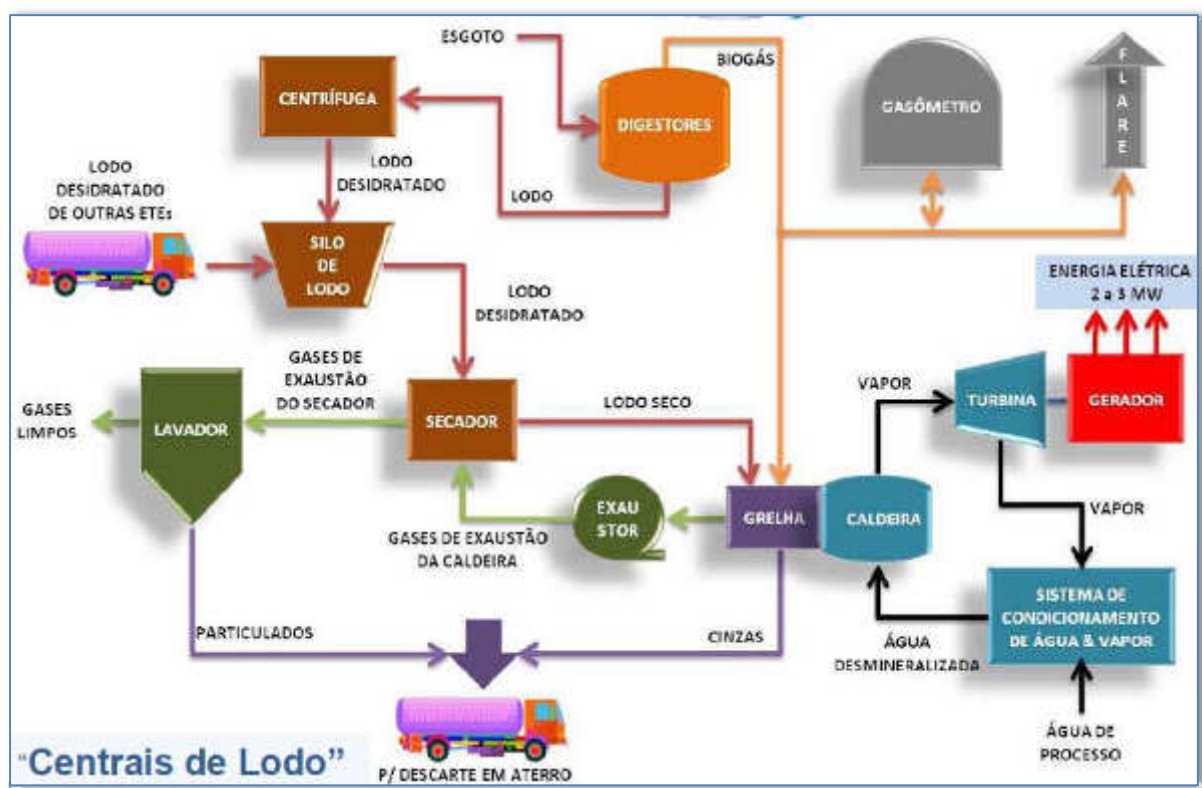


Figura C1 – Central de Lodo – Estudo da Copasa para gerar eletricidade a partir do biogás e lodo na ETE Ibitité.

Fonte: Gaio (2013)

Outro projeto interessante é a consulta pública lançada pela Sabesp – SP para a licitação de uma Estação de Processamento de Biogás e Lodo – EPBL, para a ETE de Barueri/SP da Sabesp - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, cujo sistema de tratamento é lodo ativado convencional, tratando atualmente 9.5 m³/s, com projeto já contratado para expansão para 16,5 m³/s.

Conforme Sabesp (2016) a EPBL receberá na primeira fase (5 primeiros anos) 50.000 Nm³/d de biogás e deverá ter potência instalada de 5 MW; na segunda fase, receberá 100.000 Nm³ de biogás por dia e deverá ter potência instalada de 10 MW. A EPBL deverá secar o mínimo de 500 toneladas de lodo por dia para converter em lodo seco, para queima em caldeira e/ou disposição final. A EPBL deverá também manter a temperatura do lodo bruto nos digestores (entre 35 a 37 °) fornecendo a energia térmica necessária.

O investimento da planta caberá ao proponente, o qual deverá operar e manter a planta; o proponente também será responsável pela disposição final dos resíduos da planta, incluindo o lodo; cabendo ao proponente definir o esquema de geração, o qual pode ser cogeração. Pode ser feito também a queima do lodo para gerar energia térmica.

Conclui-se que a Sabesp está procurando introduzir o aproveitamento energético do biogás, valendo-se da experiência e financiamento do fornecedor, e fazendo a transferência de riscos tecnológicos do empreendimento, procurando assim transpor a barreira tecnológica e a barreira financeira para a implantação do projeto.

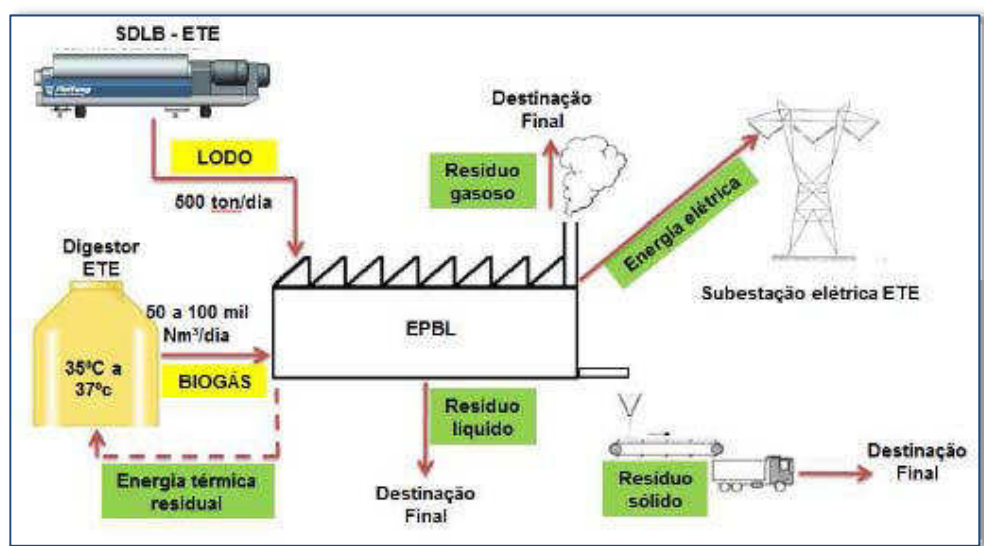
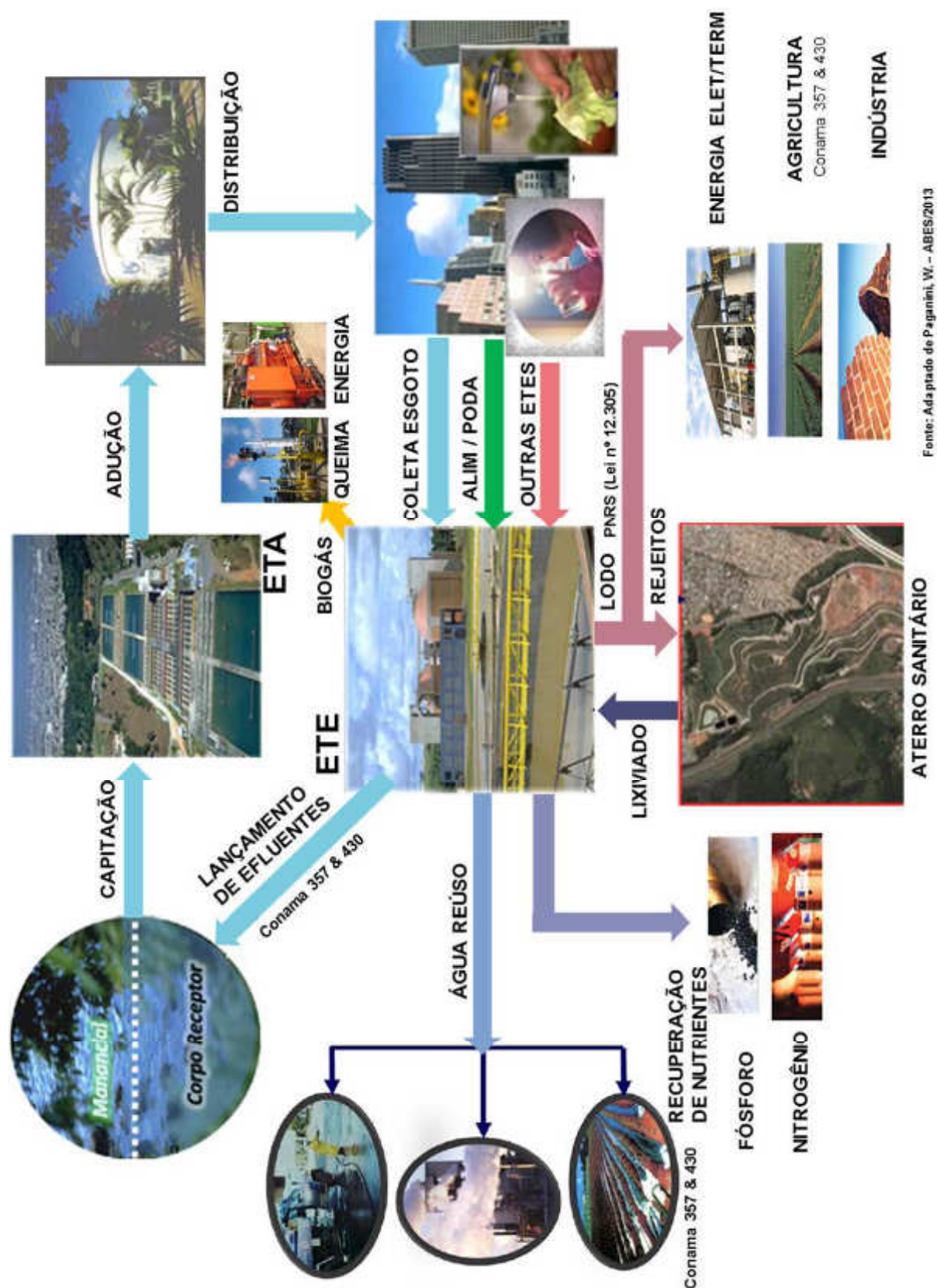


Figura C2 – ETE Barueri/SP – Sabesp –
Estação de Processamento de Biogás e Lodo (EPBL) – 5 MW
Fonte: Sabesp (2016)

APÊNDICE D – ETE SUSTENTÁVEL – GERENCIAMENTO DE SUBPRODUTOS

Fonte: Adaptado de Paganini, W. – ABES/2013



ANEXO A - BARREIRAS E PROPOSTAS DE SOLUÇÕES PARA O MERCADO DE BIOGÁS NO BRASIL – 1/6

Fonte: Jender et al. (2016)

A pesquisa “Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil” foi realizada com 38 empresas e instituições dos diversos setores atuantes no país, diretamente envolvidas com o setor do biogás, e identificou 27 barreiras que dificultam o desenvolvimento deste mercado. As barreiras e respectivas propostas para superá-las estão sumarizadas nos quadros abaixo, agrupadas nos enfoques: A, B, C e D:

- Enfoque A: Relação incerta entre o custo de projeto e seu benefício comercial
- Enfoque B: Reduzida quantidade de projetos de referência bem-sucedidos em escala comercial
- Enfoque C: Dificuldade de acesso a informações
- Enfoque D: Inexistência de políticas específicas relacionadas a biogás

ANEXO A - 2/6

TABELA A1 - COMPILAÇÃO DAS BARREIRAS, IMPACTOS E PROPOSTA DE AÇÃO PARA SUPERÁ-LAS

	Barreira	Impacto específico	Ação para remoção da barreira
A.1	Dependência de importações com a consequência da incidência alta de impostos, reduzindo as opções tecnológicas, e aumentando os custos de O&M.	Os impostos aumentam o CAPEX dos projetos em aproximadamente 50 a 70%, reduzindo seu retorno.	Redução dos impostos no nível federal (IPI, PIS-COFINS). Isenção de ICMS sobre equipamentos para geração de biogás no nível estadual.
A.2	Projetos e tecnologias estrangeiras não adaptadas às condições locais, sendo superequipadas ou não customizadas de acordo com as condições locais, resultando no aumento dos investimentos.	Aumenta o CAPEX dos projetos e reduz a eficiência do sistema, reduzindo o retorno sobre o investimento.	Direcionamento dos recursos dos fundos setoriais destinados a investimentos em Ciência, Tecnologia & Inovação (C,T&I) para implantação de projetos de biogás exclusivamente comerciais (escala plena) e que sirvam como referencial tecnológico para o setor. Tradução e disponibilização de manuais técnicos, normas, guias e estudos internacionais relevantes.
A.3	Falta de consolidação dos fornecedores locais e reduzido amadurecimento das tecnologias nacionais eleva os custos de desenvolvimento dos projetos.	Obriga projetistas a importar com altos custos ou improvisar soluções locais de baixo custo, porém não consolidadas.	Facilitar importação através de redução das cargas tributárias estimulando a concorrência e o desenvolvimento da oferta no mercado. Em longo prazo, introduzir a temática do biogás nos cursos técnicos e acadêmicos através de cooperações acadêmicas internacionais.
A.4	Falta de capacidades locais para aplicar e operar a tecnologia exige investimento elevado na capacitação de recursos humanos.	A necessidade de busca por know how no exterior aumenta o custo de desenvolvimento de RH.	Em longo prazo, introduzir a temática do biogás nos cursos técnicos e acadêmicos através de cooperações acadêmicas internacionais.
A.5	Baixas tarifas pagas pela geração de energia.	Reduz o retorno sobre o investimento.	Diferenciação pela fonte em leilões (p.ex.), e formação das tarifas pela ANEEL. Tarifas que remunerem de forma específica fontes renováveis. Modelos de negócio alternativos que contornem as baixas tarifas, por exemplo, através do <i>net metering</i> em horários de ponta.

ANEXO A - 3/6

TABELA A1 - COMPILAÇÃO DAS BARREIRAS, IMPACTOS E PROPOSTA DE AÇÃO PARA SUPERÁ-LAS

A.6	<i>Net metering</i> : Limitação de 1MW (RN 482 ANEEL) não permite otimização de escalas.	Limita o tamanho das plantas e impede um efeito de escala na redução do custo de geração do biogás, mesmo quando tecnicamente possível, reduzindo o espectro de oportunidades.	Aumento dos limites para <i>net metering</i> junto a ANEEL. Permitir que a energia gerada acima do limite do <i>net metering</i> possa ser comercializada no mercado livre.
A.7	Hora Ponta: diesel em horários de ponta não considerado na formação das tarifas.	Reduz as oportunidades de substituição da energia gerada com diesel pelo biogás.	Incluir o subsídio dado ao diesel no cálculo das tarifas de energia. Levar em consideração na elaboração da tarifa o passivo causado pela geração a diesel (em concorrência com o biogás), ex. valor de R\$ 1.041,86/MWh definido pela ANEEL para energia gerada a partir de diesel. Incluir os volumes de energia gerados através do diesel nas análises do setor energético, considerando as suas emissões.
A.8	Perda de oportunidade por não comercializar a energia térmica na cogeração.	Reduz o retorno sobre o investimento.	-
A.9	Concessão sobre gás canalizado pelas distribuidoras e baixos preços pagos por elas, sem diferenciação pela origem.	Impede o acesso direto ao mercado e ao consumidor final conectado na rede e obriga uma negociação com a distribuidora de gás, reduzindo o valor de venda e retorno sobre o investimento. Além disso a não diferenciação do biometano pela origem impede a distribuidora de atender nichos de mercado como interessados em “gás verde”, reduzindo as oportunidades de valorização do também para a distribuidora.	Criar cotas mínimas obrigatórias para biometano na rede das distribuidoras. Criar mecanismo similar ao do mercado livre (no setor elétrico) para gás, incentivando a venda direta ou <i>net metering</i> através da rede de gás. Criar um mecanismo de certificação do biometano para que as distribuidoras de gás possam atender mercados de nicho “verdes”, aumentando o valor do produto e possibilitando o pagamento de tarifas independentes do gás natural convencional aos geradores. Permitir redes de biogás dedicadas a baixa pressão independentes das distribuidoras.
A.10	Altas exigências para injeção na rede de gás (CO ₂ 3% e concentração de CH ₄ mínima), aumentando o investimento necessário.	Aumentam CAPEX/OPEX do condicionamento do biometano, reduzindo retorno do investimento.	Permitir redes de biogás dedicadas a baixa pressão independentes das distribuidoras.

ANEXO A - 4/6

TABELA A1 - COMPILAÇÃO DAS BARREIRAS, IMPACTOS E PROPOSTA DE AÇÃO PARA SUPERÁ-LAS

B.1	Histórico de Referências malsucedidas gera desconfiança no investidor.	Aumenta a expectativa de retorno sobre o investimento pelo investidor pela percepção de risco elevada.	Disponibilização de recursos (exemplo P&D), eficiência energética, etc. especialmente para cobrir capital de risco de projetos promissores. Divulgar casos de sucesso e projetos de referência.
			Reforçar a divulgação de referências bem-sucedidas em outros locais do mundo que tenham semelhança com os modelos potenciais para o Brasil.
B.2	Necessidade de busca por know-how e capacitações no exterior causa altos custos de desenvolvimento de projetos e modelos de negócio.	Aumenta o custo de desenvolvimento do mercado e dos projetos.	Reforçar e auxiliar aplicação de recursos de P&D Aneel e setor de gás em projetos exclusivamente comerciais de referência. Tradução e disponibilização de manuais técnicos, normas, guias e estudos internacionais relevantes.
B.3	Não há oferta nacional de serviços para dar suporte à manutenção e à operação das plantas de biogás devido ao baixo volume de mercado.	Causa insegurança na operação e percepção de risco elevada do empresário.	Reforçar a sistematização de informações e redes de laboratórios aptos a atender a demanda, junto a MAPA, EMBRAPA, e instituições privadas como Fundação ABC, Lactec, etc. Reforçar a medição em campo de fatores produtivos no Brasil e disponibilização destes dados aos profissionais do setor. Fortalecimento da institucionalização do setor (ABiogás, ABBM).
B.4	Baixa motivação para transferência de know-how sem exportação de equipamentos por parte das empresas estrangeiras do setor.	Aumenta a necessidade de improviso, pioneirismo com tecnologias não consolidadas por parte das empresas nacionais.	Reduzir impostos de importação. Permitir maior grau de importação em financiamentos pelo BNDES quando "sem similar nacional". Programa para fortalecer <i>joint ventures</i> entre empresas estrangeiras/brasileiras. Em longo prazo, introduzir a temática do biogás nos cursos técnicos e acadêmicos através de cooperações acadêmicas internacionais.
B.5	Baixo volume de vendas no Brasil não justifica a formação de equipes de apoio técnico para os produtos das empresas estrangeiras no Brasil.	Reduz investimento estrangeiro e reduz a atratividade para o comprador da tecnologia importada no Brasil.	Fortalecimento da institucionalização do setor (ABiogás, ABBM). Programa para fortalecer <i>joint ventures</i> entre empresas estrangeiras e brasileiras.

ANEXO A - 5/6

TABELA A1 - COMPILAÇÃO DAS BARREIRAS, IMPACTOS E PROPOSTA DE AÇÃO PARA SUPERÁ-LAS

B.6	Dificuldade de encontrar empresas brasileiras parceiras comprovadamente experientes no ramo (com referências) para desenvolvimento conjunto do mercado.	Reduz interesse de empresas internacionais, experientes com biogás, no mercado brasileiro.	Fortalecimento da institucionalização do setor (ABiogas, ABBM) Programa para fortalecer <i>joint ventures</i> entre empresas estrangeiras e brasileiras.
C.1	Faltam cursos, capacitações, palestras, eventos e workshops de qualidade e específicos sobre as tecnologias do biogás no Brasil.	A necessidade de busca por know how no exterior aumenta o custo de desenvolvimento de RH.	Fortalecimento da institucionalização do setor (ABiogas, ABBM).
C.2	Faltam bancos de dados sistematizados sobre substratos e seus potenciais de produção de biogás no Brasil, assim como, uma rede de laboratórios apta a atender as demandas dos projetos.	Causa insegurança na operação das plantas e aumenta o tempo de desenvolvimento de projetos.	Fortalecimento da institucionalização do setor (ABiogas, ABBM) Reforçar a sistematização de informações e redes de laboratórios aptos a atender a demanda, junto a MAPA, EMBRAPA, e instituições privadas como Fundação ABC, Lactec, etc. Reforçar a medição em campo de fatores produtivos no Brasil e disponibilização aos profissionais do setor.
C.3	Não há acesso a referências sobre soluções tecnológicas características do mercado brasileiro como uso da energia térmica na cogeração e adaptação de projetos as oportunidades específicas do mercado brasileiro.	Exige pioneirismo tecnológico e, portanto, aumenta a percepção de risco.	Publicação de Fact sheets pela ABiogas, ABBM, com validação por instituições reconhecidas como GIZ, etc. No caso de empresas públicas, a criação de um guia técnico para licitações de projetos de biogás reduz o pioneirismo no setor público.
C.4	Falta de sistematização de bancos de dados sobre empresas, fornecedores, prestadores de serviços, consultores e profissionais da área no Brasil ou no exterior atuantes no país.	Aumenta muito o tempo de desenvolvimento de projetos.	Fortalecimento da institucionalização do setor (ABiogas, ABBM).
C.5	Difícil acesso a informações sobre oportunidades, custos de nacionalização de equipamentos, formas de comercialização dos outputs, possíveis arranjos comerciais, incentivos de mercado existentes, recursos disponíveis (P&D, etc.)	Aumenta muito o tempo de desenvolvimento de projetos.	Fortalecimento da institucionalização do setor (ABiogas, ABBM)
C.6	Não há um ponto de consulta centralizado de informações legais e regulatórias com implicação direta sobre o negócio do biogás.	Aumenta os tempos de análise e licenciamento ambiental ou mesmo impede a regularização.	Criação de uma câmara de comércio de biogás, biometano e seus produtos (a exemplo da CCEE). Sistematização/ homogeneização dos processos e licenciamento ambiental em nível nacional, criando códigos de enquadramento específicos. Guia de técnico sobre biogás para técnicos dos órgãos ambientais.

ANEXO A - 6/6

TABELA A1 - COMPILAÇÃO DAS BARREIRAS, IMPACTOS E PROPOSTA DE AÇÃO PARA SUPERÁ-LAS

D.1	Necessidade de uma política inter setorial que seja capaz de fomentar o biogás como fonte de energia renovável e solução de saneamento.	Emite sinal de "menor importância, não prioritária" na estratégia nacional, passível de mudanças imprevisíveis de rumo sem suporte político a médio, longo prazo.	Criação de um comitê para discussão sobre temas relacionados ao biogás formado por diferentes ministérios (MME, MMA, MAPA, MCid, MDIC, etc.) para o desenvolvimento de uma política nacional. Criação de linhas de financiamento específicas. Fortalecimento da institucionalização do setor (ABiogás, ABBM).
D.2	Ainda incipiente diálogo interno entre os setores público, privado e órgãos responsáveis pelo planejamento energético brasileiro.	Aumenta complexidade na formação de estratégias de longo prazo dos empreendimentos e emite sinal de "menor importância, não prioritária" na estratégia nacional, passível de mudanças imprevisíveis de rumo sem suporte político a médio, longo prazo.	Criação de um comitê para discussão sobre temas relacionados ao biogás formado por diferentes ministérios (MME, MMA, MAPA, MCid, MDIC, etc.) para o desenvolvimento de uma política nacional.
D.3	Falta promoção de linhas de financiamento e incentivos eficientes para o setor, por exemplo, por uma rede ou instituição específica.	Dificulta o acesso a meios financeiros que viabilizem os projetos de acordo com suas características.	Desenvolver mecanismos e linhas de financiamento específicas para biogás. Possibilitar soluções integradas de financiamento junto com recursos do OGU. Treinamento e capacitação técnica dos analistas dos bancos públicos e privados para que saibam avaliar projetos de biogás.
D.4	Dificuldade em apresentar garantias para a obtenção de financiamentos e insegurança financeira para firmar contratos de curto prazo no mercado livre que possibilitem, temporariamente, tarifas mais atrativas.	Reduz a possibilidade de os projetos aproveitarem oportunidades causadas pela volatilidade dos preços de energia por um lado e de acesso a substratos por outro. No caso específico do RSU e consórcios públicos a impossibilidade de dar as tarifas de lixo como garantias inviabiliza o acesso a financiamentos.	Definição de um preço fixo (ex. R\$ 633,94/MWh estabelecido pela ANEEL para biogás) por um tempo mínimo determinado, reduzindo o risco do investimento. Definição de um piso mínimo da tarifa de energia gerada a partir do Biogás por um período de médio prazo. Possibilitar soluções integradas de financiamento junto com recursos do OGU.
D.5	Faltam mecanismos de incentivo desenhados especialmente para que a autoprodução e geração distribuída de energia através do biogás se torne um negócio rentável. Por exemplo: o uso de diesel no horário de ponta, somada às baixas tarifas aplicadas fora do horário de ponta são condições que desestimulam o desenvolvimento de sistemas eficientes de geração pelo biogás.	Reduz o espectro de oportunidades para autogeradores.	Definição de um preço fixo (ex. R\$ 633,94/MWh estabelecido pela ANEEL para biogás) por um tempo mínimo determinado, reduzindo o risco do investimento. Ver soluções para as barreiras A5 e A6.

Fonte: Jende et al. (2016)

ANEXO B – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO ESGOTO SANITÁRIO E SUAS CONTRIBUIÇÕES PER CAPITA – 1/1

Tabela B.1: Principais características físicas e químicas do esgoto sanitário e suas contribuições per capita.

PARÂMETRO	CONTRIBUIÇÃO PER CAPITA (g/hab.d)		CONCENTRAÇÃO		
	FAIXA	TÍPICO	UNIDADE	FAIXA	TÍPICO
Sólidos Totais	120 – 220	180	mg/L	700 – 1350	1100
Em suspensão	35 – 70	60	mg/L	200 – 450	350
<i>Fixos</i>	7 – 14	10	mg/L	40 – 100	80
<i>Voláteis</i>	25 – 60	50	mg/L	165 – 350	320
Dissolvidos	85 – 150	120	mg/L	500 – 900	700
<i>Fixos</i>	50 – 90	70	mg/L	200 – 550	400
<i>Voláteis</i>	35 – 60	50	mg/L	200 – 350	300
Sedimentáveis	–	–	mL/L	10 – 20	15
Matéria orgânica					
DBO ₅	40 – 60	50	mg/L	250 – 400	300
DQO	80 – 120	100	mg/L	450 – 800	600
DBO _{última}	60 – 90	75	mg/L	350 – 600	450
Nitrogênio total	6,0 – 10,0	8,0	mgN/L	35 – 60	45
Nitrogênio orgânico	2,5 – 4,0	3,5	mgN/L	15 – 25	20
Amônia	3,5 – 6,0	4,5	mgNH ₃ / – N/L	20 – 35	25
Nitrito	~0	~0	mgNO ₂ / – N/L	~0	~0
Nitrato	0,0 – 0,2	~0	mgNO ₃ / – N/L	0 – 1	~0
Fósforo	0,7 – 2,5	1,0	mgP/L	4 – 15	7
Fósforo orgânico	0,2 – 1,0	0,3	mgP/L	1 – 6	2
Fósforo inorgânico	0,5 – 1,5	0,7	mgP/L	3 – 6	5
pH	–	–	–	6,7 – 8,0	7,0
Alcalinidade	20 – 40	30	mgCaCO ₃ /L	100 – 250	200
Metais pesados	~0	~0	mg/L	traços	traços
Compostos orgânicos tóxicos	~0	~0	mg/L	traços	traços

Fonte: Arceivala (1981), Pessoa & Jordão (1995), Qasim (1985), Metcalf & Eddy (1991), Cavalcanti et al. (2001) e Von Sperling (2005).

Fonte: Silveira et al. (2015)

ANEXO C – Artigo: O gaz dos esgotos – 1936 – 1/3

Fonte: Revista RAE Nº 1 (1936)

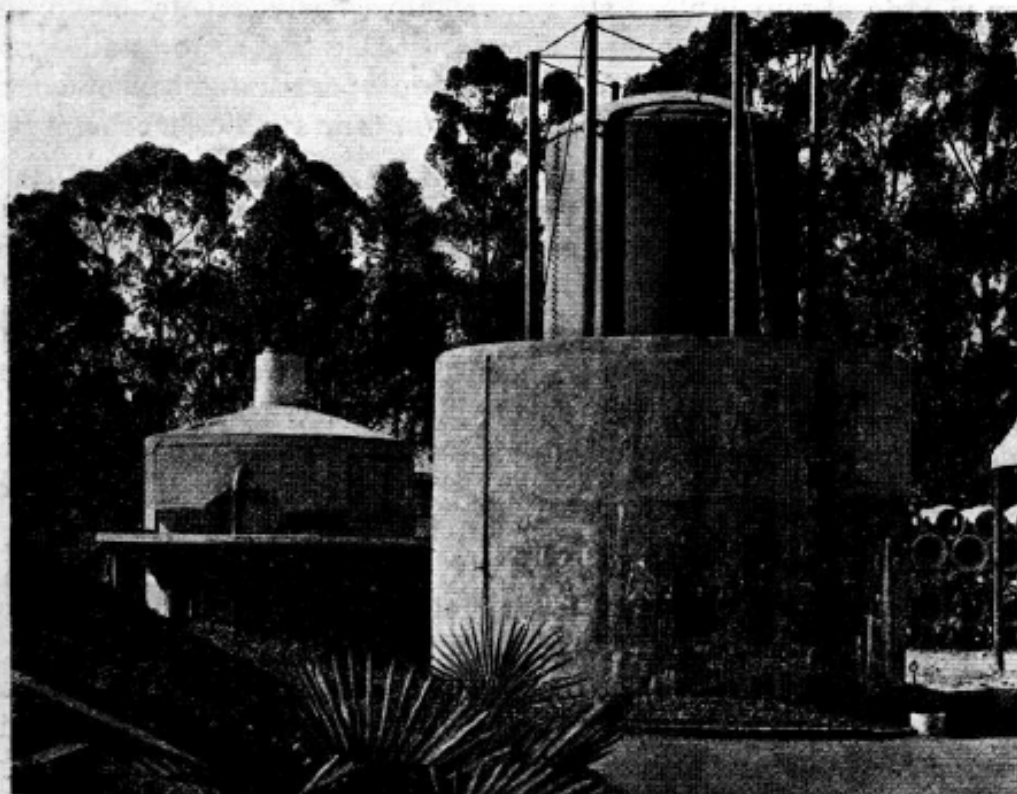
O gaz dos esgotos

*J. P. Jesus Netto*Engenheiro da 2.^a S. T. da R. A. E.

A gravura abaixo focaliza um aspecto da pequena estação experimental de tratamento de esgotos da Ponte Pequena: — um gazometro, no primeiro plano, destinado ao armazenamento do gaz captado nas diversas unidades de tratamento, e, ao fundo, um decantador e digestor circular do typo “Imhoff”.

A’ proposito da captação e utilização dos gases de esgotos, nas instalações de tratamento, ocorre-nos algumas considerações no sentido de esclarecer sobre o valor e praticabilidade desse importante problema entre nós.

Os mais recentes autores de engenharia sanitaria consideram hoje a utilização dos gases de esgotos como parte necessaria e integrante das modernas instalações de tratamento, seja para o aquecimento artificial dos digestores, ou seja para fins de iluminação e força motriz.



ANEXO C - 2/3

Boletim da Repartição de Aguas e Esgotos

A estação da Ponte Pequena não podia descurar o estudo pratico desse problema; investigou-o longamente em todos os seus detalhes, chegando aliás, com minimas variantes, ás mesmas conclusões e resultados divulgados na litteratura estrangeira sobre o assumpto.

O problema não pertence mais á classe das tentativas, mas entrou já na phase de franco e decisivo successo, removidos que foram os obices que á captação dos gases offereciam os velhos e classicosapparelhos de tratamento de esgotos.

Os modernos decantadores de dois compartimentos, e os digestores de lodo mechanizados, tornaram a solução do problema de tal modo facil, que a previsão do aproveitamento do gaz é actualmente obrigatorio em todo o projecto de tratamento justo e equilibrado.

E' evidente que ha um limite pratico na solução do problema, limite esse marcado pelas condições economicas do aproveitamento.

Segundo os engs. sanitarios consultivos Kadermacher e Delkeskamp, de Wiesbaden (Städthygiene und Wasserbaugesellschaft — M. B. H.), as installações de 3000 m. c. diarios, ou sejam mais ou menos 35 l.^{os}/seg^o, ou ainda 15000 pessoas a 200 l.^{os} de despejos "per capita", — são já productivas e economicamente aproveitaveis na producção de energia motora, cobrindo geralmente as necessidades de força motriz das respectivas estações de tratamento. Na pelor das hypotheses o gaz servirá para o aquecimento dos digestores, augmentando-lhes assim o rendimento, e dando um lodo final em optimas condições de digestão technica e economica.

A estação da Ponte Pequena tem obtido gazes com 60 — 70% de methana e 6000 — 6500 calorías, á razão de cêrca de 80 l.^{os} de gaz por m.c. de esgoto bruto. Este rendimento é visivelmente baixo, mas é preciso attender-se a que os digestores da estação são estaticos, sem aquecimento, e o processo de gazeificação opera-se inteiramente á custa dos phenomenos bio-chimicos naturaes, sem auxilios mechanicos.

Modernamente calcula-se o rendimento das estações mechanizadas, na base de 28 l.^{os} de gaz por pessoa e por dia.

O gaz assim obtido attinge facilmente 80 — 85% de CH₄, com 7000 calorías por m. c. (0° — 760 m/m.).

O rendimento em força motriz oscilla entre 0.4 — 0.5 m. c. por cavallo-hora, conforme o typo e a grandeza do motor usado. A base segura de calculo deve ser porém de 0.5 m. c. por HP-hora — Na Ponte Pequena, com motores adaptados, de pequena capacidade, obteve-se todavia um consumo medio de 0.3 — 0.4 mc. por cavallo-hora em carga.

Na base de 28 litros de gaz "per capita" verifica-se que cada 20 habitantes, ligados á installação de tratamento, produzem folgadamente um cavallo-hora de energia electrica.

Haveria a objectar o desgaste dos motores ordinarios á explosão, dadas as condições de alta temperatura de ignição dos gazes cloacaes, e algumas vezes conterem estes pequenas porcentagens de hydrogenio sulfurado.

ANEXO C - 3/3

Boletim da Repartição de Aguas e Esgotos

Mas já se fabricam motores adequados para esse fim: as fabricas Clark, Worthington Co. — N. Jersey, Cooper Bessemer Co. — Ohio, dos E. Unidos, e a conhecida Deutz Motoren Fabrik da Allemanha, para não citar outras, constróem motores apropriados até 1000 HP. de capacidade.

Dentre as cidades allemans que fazem uso do gaz nas suas installações de tratamento (Kläranlagen für Häusliches Städtische Abwasser) pode-se citar: Pössneck, Tarnowitz, Magdeburg, Berlim, Erfurt, Leipzig, Halle, München, Beuthen, Gleiwitz, Waldenburg, Hindenburg O. S., Valle do Emscher (Emschergesellschaft).

Citaremos ainda, por alto, Johannesburgo, na Africa do Sul, Birmingham, na Inglaterra, Newark, Geneva, Lancaster, Schenectady, Durham, Columbia, Madison, Chicago, Peoria, York, Ann Arbor, Walden, New York (Con. Island) dos Estados Unidos.

Destas installações, duas são dignas de nota: Berlim, (Wassmansdorf), com um maravilhoso equipamento de 7 motores Deutz, num total de 2400 HP. consumindo 416 l^{as}. de gaz cloacal por cavallo-hora, com 7000 calorías, e mistura carburante de 1 de gaz para 3 de ar; e Birmingham, na Inglaterra, com 950 HP.

Heilmann ("Gesundheit Ingenieur" — Dec. 935) relata que existem actualmente cerca de 100 caminhões automoveis, no Districto do Ruhr Allemanha), aparelhados para empregar o gaz cloacal como combustível.

Usam tanques contendo cerca de 500 pés cubicos de gaz, comprimido a mais ou menos 400 libras. Com treis desses tanques um caminhão de 5 toneladas pode percorrer 225 milhas, com cerca de 60% de economia sobre o custo da essencia.

A "Revue Demag" (Junho de 1936) descreve em seus detalhes um Posto de Abastecimento de Gaz para caminhões automoveis (Gas Tankstelle), destinado ao fornecimento de gazes, — propana e butana, gaz de iluminação, gaz de madeira, e gaz cloacal (methana), armazenados em cylindros apropriados, sob pressões que vão de 20 até 200 atmosferas.

S. Paulo vae ter brevemente, na Estação de tratamento do Ypiranga, em construcção, uma installação thermo-eletrica de 15 HP., com motor Deutz para gás cloacal, destinada a movimentar as bombas elevatorias de esgotos e lodos da installação.

Assim tambem, a installação de tratamento já delineada em anteprojecto para o effluente de esgotos da Cidade, (valles do Tamanduatehy e Tieté), a ser construida em Villa Leopoldina, no extremo do grande Emissario, — e cuja importancia em nada ficará a dever, em tamanho e volume, á grande installação de Berlim-Wassmansdorf, — foi contemplada com um equipamento thermo-electrico, constituido de 3 grupos motores, cada um de 750 HP., num total de 2250 H. P., impulsioneados pelos 28000 metros cubicos de gazes de esgotos de que disporá a installação de tratamento, por dia.

ANEXO D – BALANÇO DE DQO NO REATOR UASB E TAXA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS – MÉTODO LOBATO – 1/5

Fonte: Silveira (2015)

No balanço de DQO, é necessário considerar todas as vias de transferência. A Figura D1 ilustra as rotas de conversão de DQO e os fluxos de metano em reatores UASB, resultando em 4 parcelas principais de DQO:

- DQO convertida em biogás/metano:
 - Metano presente no biogás captado;
 - Metano dissolvido no efluente, dependente principalmente da concentração de DQO no afluente e da temperatura;
 - Metano escapando com o gás residual, na captação de biogás, etc.
- DQO convertida em lodo/biomassa:
 - Biomassa retida no reator;
 - Biomassa carregada no efluente, por exemplo, por causa da carga hidráulica elevada, acidez ou outras inibições.
- DQO usada para a redução de sulfato, em caso de concentrações elevadas;
- DQO residual no efluente:
 - DQO inerte;
 - Subprodutos (ácidos orgânicos)

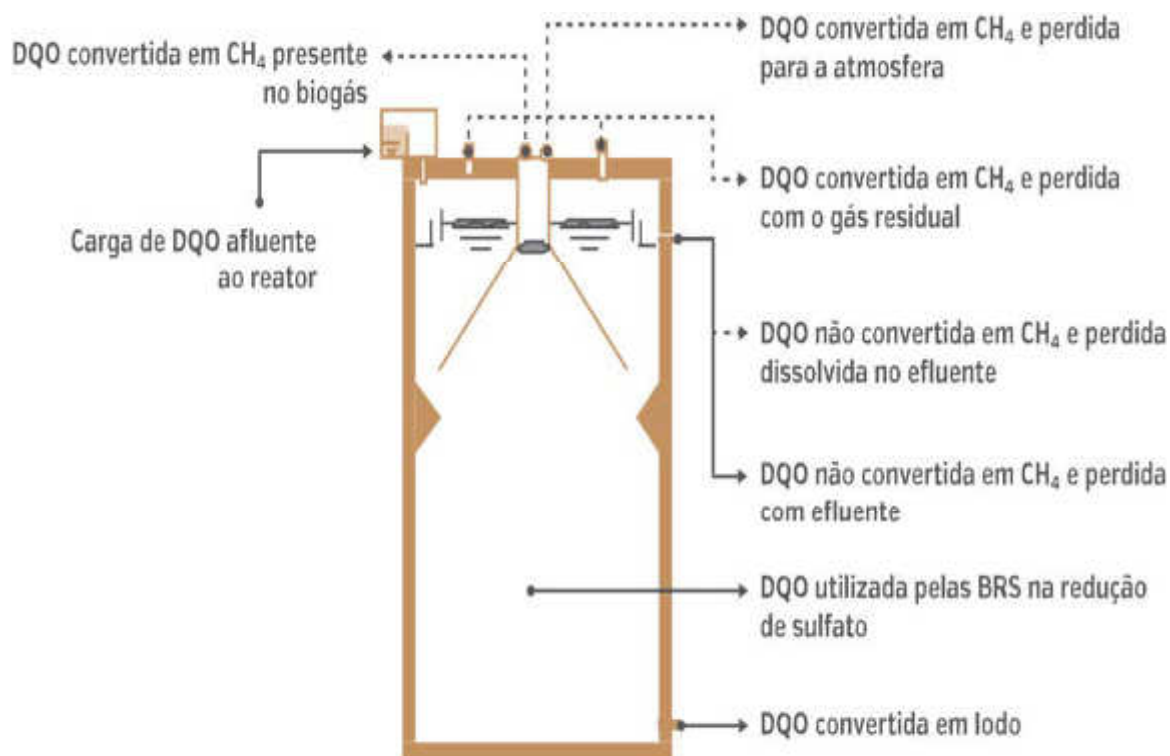


Figura D1: Representação esquemática das rotas de conversão de DQO e dos fluxos de metano em reatores UASB.

Fonte: Adaptado de Lobato (2011)

ANEXO D – 2/5

Dessas vias, a mais difícil para controlar e verificar é a parcela do metano que sai do sistema dissolvida no efluente. Essa parcela pode ser significativa quando a concentração de DQO no afluente é muito baixa.

Por um lado, o metano tem baixa solubilidade em água e, portanto, pode ser rapidamente separado da fase líquida em reatores UASB. Por outro lado, o dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio são muito solúveis, saindo do reator parcialmente como gás e também dissolvidos no efluente líquido. (Chernicharo & Stuetz, 2008; Souza *et al.*, 2010).

Contudo, em reatores UASB tratando esgoto doméstico, tem sido observada a supersaturação do metano na fase líquida, o que, segundo os cálculos baseados na lei de Henry, pode levar a concentrações entre 15 e 50% de metano na fase líquida (Van Haandel & Lettinga, 1994). Os valores de perda de metano observados na prática normalmente variam entre 14% (Keller & Hartley, 2003), 36 a 41% (Souza *et al.*, 2010) e 50% (Agrawal *et al.*, 1997 e Pierotti, 2007). Normalmente, essa perda aumenta com a carga hidráulica aplicada, mas depende também de fatores como: temperatura e pressão parcial do gás no interior do reator, bem como tamanho da superfície líquida do reator. Devido à complexidade das análises em escala real, ainda existem bastantes dúvidas sobre os valores reais das perdas de metano juntamente com o efluente.

Estudos de comparação entre as estimativas de produção de biogás e os resultados de medições foram recentemente realizados por Silva *et al.* (2014). Esses estudos reportam que a quantidade de energia estimada pelos métodos existentes é, em média, maior que aquela realmente disponível para uso. Isso acontece porque tais métodos não consideram as perdas de metano, assim como algumas importantes rotas de conversão de DQO durante o tratamento anaeróbio do esgoto.

ANEXO D – 3/5

Possetti et al. (2013) mensuraram a produção de metano em reatores UASB em escala real. Os resultados mostram que a produção de biogás segue um comportamento temporal variável, periódico e não-estacionário, o qual depende criticamente das variações na vazão e da concentração do esgoto durante o dia, sofrendo influências por eventos de chuva. A Figura D2 apresenta uma curva típica de vazão de biogás em função do tempo, na ausência de eventos de chuvas, para quatro reatores UASB alimentados com esgoto sanitário pouco concentrado.

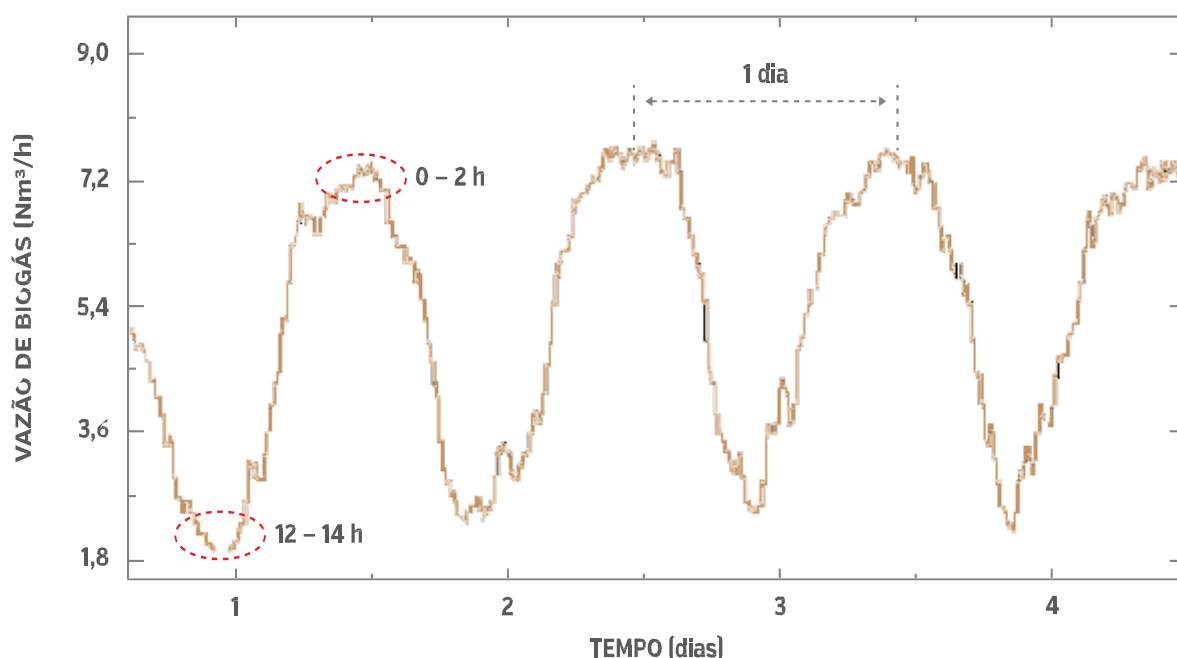


Figura D2: Curva típica de vazão de biogás em função do tempo, na ausência de eventos de chuvas, para quatro reatores UASB alimentados com esgoto sanitário pouco concentrado.

Fonte: Adaptado de Possetti et al. (2013)

ANEXO D – 4/5

Como o modelo proposto por Lobato (2011) contempla as quantidades de metano dissolvidas no meio líquido, assim como as perdas na forma de gases residuais e as perdas relacionadas à redução de sulfato, ele expressa de forma mais verossímil os fenômenos físicos, químicos e biológicos inerentes aos reatores UASB, fazendo com que os resultados obtidos a partir de sua aplicação apresentem menor desvio em relação aos valores mensurados.

Por isso, recomenda-se que as tomadas de decisão inerentes à recuperação do biogás sejam baseadas em resultados de medições e que, se porventura tal prática não for exequível, o modelo proposto por Lobato (2011) seja utilizado. Além disso, sugere-se que a análise de incertezas também seja realizada com o intuito de quantificar as limitações e os riscos inerentes aos projetos.

Diferentes relações unitárias foram obtidas a partir de simulações de cenários e da aplicação do modelo proposto por Lobato (2011). Dessa forma, consideraram-se três situações que acarretam em potenciais de recuperação de metano diferentes: (i) pior situação; (ii) situação típica; e (iii) melhor situação. A pior situação, na qual o potencial energético é menor, refere-se a sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano. A melhor situação, em que o potencial energético é maior, refere-se a sistemas operando com esgoto mais concentrado, menores concentrações de sulfato, maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano. Para a situação típica, foram utilizados valores intermediários para os dados de entrada. Os resultados dessas simulações estão sumarizados na Tabela D1.

ANEXO D – 5/5

Essas relações unitárias são apenas valores de referência. Para a estimativa mais acurada das taxas de produção de biogás e de metano em reatores UASB alimentados com esgoto sanitário, sugere-se a utilização do programa computacional intitulado ProBio – Programa de Estimativa de Produção de Biogás em Reatores UASB. A versão 1.0 do ProBio é gratuita e está disponível para download nos seguintes endereços eletrônicos: www.desa.ufmg.br/software.html e www.sanepar.com.br. Está disponível para download o manual do usuário e a manual fundamentação teórica.

Tabela D1. Relações unitária de produção de metano, de biogás e de energia em reatores UASB tratando esgoto sanitário. (NL: Normal Litro)

RELAÇÃO UNITÁRIA	UNIDADE	PIOR SITUAÇÃO			SITUAÇÃO TÍPICA			MELHOR SITUAÇÃO		
		MÁX.	MÍN.	MÉDIA	MÁX.	MÍN.	MÉDIA	MÁX.	MÍN.	MÉDIA
Volume unitário de CH ₄ produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	9,9	3,6	6,8	13,3	7,4	10,2	16,7	11,1	13,7
	NL.m ⁻³ esgoto	81,7	16,7	42,2	103,7	34,8	64,2	134,6	51,8	81,3
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	154,1	66,0	113,4	185,8	124,2	158,3	219,1	173,9	196,0
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	14,1	5,2	9,8	17,7	9,9	13,6	20,8	13,9	17,1
	NL.m ⁻³ esgoto	116,7	23,8	60,3	138,3	46,4	85,6	168,3	64,8	101,6
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	220,1	94,3	162,0	247,8	165,6	211,1	273,9	217,4	245,0
Potencial energético unitário	kWh.m ⁻³ esgoto	0,8	0,2	0,4	1,0	0,3	0,6	1,3	0,5	0,8
	kWh.kgDQO _{remov} ⁻¹	1,5	0,7	1,1	1,9	1,2	1,6	2,2	1,7	2,0
	kWh.Nm ⁻³ biogás	7,0	7,0	7,0	7,5	7,5	7,5	8,0	8,0	8,0
	kWh.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
	MJ.m ⁻³ esgoto	2,9	0,6	1,5	3,7	1,2	2,3	4,8	1,9	2,9
	MJ.kgDQO _{remov} ⁻¹	5,5	2,4	4,1	6,7	4,5	5,7	7,9	6,2	7,0
	MJ.Nm ⁻³ biogás	25,1	25,1	25,1	26,9	26,9	26,9	28,7	28,7	28,7
	MJ.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	0,4	0,1	0,2	0,5	0,3	0,4	0,6	0,4	0,5

Fonte: Lobato (2011)