unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

SYLVIA HELENA PINTO CHAGAS LEITE

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Guaratinguetá
2013

SYLVIA HELENA PINTO CHAGAS LEITE

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri

Guaratinguetá
2013

Leite, Sylvia Helena Pinto Chagas
L533a Aproveitamento energético de resíduos de esgotamento sanitário / Sylvia Helena Pinto Chagas Leite – Guaratinguetá : [s.n], 2013.
39 f : il.
Bibliografia: f. 36

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri

1. Esgotos 2. Biogás I. Título

CDU 628.21

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

SYLVIA HELENA PINTO CHAGAS LEITE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. JOSÉ NÉDILO CARRINHO DE CASTRO
UNESP-FEG

Eng. LUANA RAMOS PASSOS
Membro Externo

Dezembro de 2013

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos meus pais que sempre foram os pilares da minha educação, me incentivando e me apoiando em meus projetos de vida.

aos meus familiares que estiveram presente em todos os momentos em que precisei.

ao meu orientador Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri pela paciência, ajuda, apoio e orientação neste trabalho.

a todos os meus amigos que contribuíram para meu crescimento e me deram forças nos momentos difíceis.

a UNESP-FEG, de forma geral que me proporcionou muitas oportunidades ao longo dos anos.

LEITE, S. H. P. C. **Aproveitamento energético de resíduos de esgotamento sanitário**. 2013. 39 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Este trabalho apresenta alternativas de aproveitamento energético para os resíduos provenientes do esgotamento sanitário das cidades. Através de uma revisão da literatura observa-se que as tecnologias usualmente estudadas empregam turbinas, microturbinas e motores adaptados ao uso de biogás. Para concepção de projeto são analisadas as tecnologias encontradas em algumas plantas de tratamento de esgoto no Brasil e no mundo, comparadas com as encontradas na literatura. Com o estudo pode se concluir que as tecnologias mais utilizadas empregam microturbinas e grupos moto-geradores, sendo estas já sido implantadas em alguns lugares dos EUA, Europa e até mesmo no Brasil. Pode se concluir também que o aproveitamento energético dos resíduos do esgotamento sanitário pode viabilizar projeto de estações de tratamento de esgoto contribuindo assim para melhoria na qualidade de vida das pessoas.

PALAVRAS-CHAVE: Esgoto. Biogás. Aproveitamento energético.

LEITE, S. H. P. C. **Energy recovery of waste from sewage**. 2013. 39 f. Graduate Work (Graduate Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

This paper presents alternatives for waste energy recovery from the sewage of cities. Through a review of the literature it is observed that the technologies studied are usually turbines, microturbines, and engines adapted to the use of biogas. For project design analyzes the technologies found in some sewage treatment plants in Brazil and the world, compared with those found in the literature. With this study it can be concluded that the most used technologies are microturbines and motor generator sets, which are already implemented in some locations in the USA, Europe and even Brazil. It can also be concluded that the energy recovery of waste from sewage can enable design of wastewater treatment plants thereby contributing to improved quality of life.

KEYWORDS: Wastewater. Biogas. Energy use.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Domicílios particulares permanentes, por existência de banheiro ou sanitário e tipo de esgotamento sanitário.....9
Figura 2 - Etapas de tratamento de esgoto.....14
Figura 3 – Biodigestor contínuo.....16
Figura 4 – Biodigestor descontínuo.....17
Figura 5 – Sistema de purificação de biogás.....18
Figura 6 - Comparação entre as tecnologias.....24
Figura 7 - Aproveitamento energético com uso de turbinas/microturbinas.....25
Figura 8 – Microturbinas da Planta de Tratamento de Esgotos de Chiquita.....26
Figura 9 – Uso de microturbinas na Estação de Tratamento de Esgotos Arrudas.....27
Figura 10 - Aproveitamento energético com uso de motores a biogás.....28
Figura 11 – Motor a gás da Estação de Tratamento de Esgotos de Ontario, Canadá.....30
Figura 12 - Grupo moto-gerador da Estação de Tratamento de Esgotos Ouro Verde.....31
Figura 13 - Concepções de projeto.....33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9

2 CONCEITOS BÁSICOS 13

2.1 PROCESSO DE TRATAMENTO DE ESGOTO..... **Erro! Indicador não definido.**

2.2 BIOGÁS 15

3 REVISÃO DA LITERATURA 20

4 CONCEPÇÕES DE PROJETO..... 255

4.1 USO DE TURBINAS E MICROTUBINAS..... 255

4.1.1 Planta de Tratamento de Esgoto de Chiquita (Santa Margarida – Estados Unidos)..... 26
6

4.1.2 Planta de Tratamento de Esgoto de Sheboygan (Estados Unidos) 266

4.1.3 Planta de Tratamento de Esgoto de Allentown (Estados Unidos) 277

4.1.4 Estação de Tratamento de Esgotos Arrudas (Brasil)..... 277

4.2 USO DE GRUPOS MOTO-GERADORES..... 288

4.2.1 Planta de Tratamento de Esgoto Point Loma (Estados Unidos)..... 288

4.2.2 Planta de Tratamento de Esgoto de Portland Columbia Boulevard (Estados Unidos)..... 299

4.2.3 Planta de Tratamento de Esgotos de Seafield (Escócia) 299

4.2.4 Planta de Tratamento de Esgotos de Santiago (Chile)..... 299

4.2.5 Planta de Tratamento de Esgotos de Psyttalia (Grécia) 299

4.2.6 Planta de Tratamento de Esgotos de Hamilton, Ontario (Canadá)..... 30

4.2.7 Planta de Tratamento de Esgotos de East Bay (Estados Unidos) 30

4.2.8 Planta de Tratamento de Esgotos de Gresham (Estados Unidos)..... 31

4.2.9 Estação de Tratamento de Esgotos Ouro Verde (Brasil)..... 311

4.3 OUTRAS FORMAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO 322

4.3.1 Unidade de tratamento de esgoto de Oxfordshire (Reino Unido) 322

4.3.2 Utilização de células combustíveis microbianas para geração de energia 322

4.3.3 Unidade de tratamento de esgoto de Copenhague (Dinamarca) 333

5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS 344

6 CONCLUSÕES 355

REFERÊNCIAS 366

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas existentes ainda no mundo é com relação ao destino dado ao esgotamento doméstico, tanto do ponto de vista ambiental quanto do ponto de vista de planejamento de cidades. No Brasil, segundo o Censo 2010[1], apenas 55,45% das residências que possuem sanitários contam com a rede de esgotos, sendo que em alguns estados da região norte do país os números são ainda mais alarmantes, como em Rondônia, por exemplo, em que somente 6,07% das residências contam com o tratamento de esgoto, conforme consta na figura 1.

Figura 1 – Domicílios particulares permanentes, por existência de banheiro ou sanitário e tipo de esgotamento sanitário

Região	Grandes Regiões e Unidades da Federação	Ano	Domicílios particulares permanentes	Com existência de banheiro ou sanitário								Sem existência de banheiro ou sanitártio	
				Total		Rede de esgoto ou pluvial		Fossa séptica		Outro			
				Absoluto	(%)	Absoluto	(%)	Absoluto	(%)	Absoluto	(%)	Absoluto	(%)
	Brasil	2010	57.324.185	55.808.151	97,36%	31.786.054	55,45%	6.653.292	11,61%	17.368.708	30,30%	1.514.930	2,64%
		2000	42.707.925	39.736.315	93,04%	20.757.686	48,60%	6.477.651	15,17%	12.500.978	29,27%	2.971.610	6,96%
N	Região Norte	2010	3.975.533	3.791.614	95,37%	555.832	13,98%	749.037	18,84%	2.486.743	62,55%	183.846	4,62%
		2000	2.594.253	2.299.022	88,62%	268.207	10,34%	712.442	27,46%	1.318.373	50,82%	295.231	11,38%
NE	Região Nordeste	2010	14.922.901	13.756.975	92,19%	5.069.256	33,97%	1.677.507	11,24%	7.010.200	46,98%	1.165.684	7,81%
		2000	10.562.979	8.357.325	79,12%	2.805.836	26,56%	1.412.108	13,37%	4.139.381	39,19%	2.205.654	20,88%
SE	Região Sudeste	2010	25.199.799	25.102.617	99,61%	20.427.066	81,06%	1.373.303	5,45%	3.302.191	13,10%	96.613	0,38%
		2000	19.491.405	19.245.217	98,74%	14.513.778	74,46%	1.715.590	8,80%	3.015.849	15,47%	246.188	1,26%
S	Região Sul	2010	8.891.279	8.849.774	99,53%	4.070.086	45,78%	2.283.642	25,68%	2.496.024	28,07%	41.378	0,47%
		2000	7.021.440	6.902.538	98,31%	2.129.404	30,33%	2.407.693	34,29%	2.365.441	33,69%	118.903	1,69%
CO	Região Centro-Oeste	2010	4.334.673	4.307.171	99,37%	1.663.814	38,38%	569.803	13,15%	2.073.550	47,84%	27.409	0,63%
		2000	3.037.848	2.932.214	96,52%	1.040.462	34,25%	229.818	7,57%	1.661.934	54,71%	105.634	3,48%
N	Rondônia	2010	455.599	448.348	98,41%	27.637	6,07%	73.108	16,05%	347.603	76,30%	7.239	1,59%
		2000	327.471	296.484	90,54%	12.784	3,90%	58.732	17,94%	224.968	68,70%	30.988	9,46%

Fonte: http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=P16&uf=00

A falta de tratamento de esgoto pode levar a ocorrência de várias doenças, como: poliomelite, hepatite A, giardíase, disenteria amebiana, diarréia por vírus, febre tifóide, febre paratifóide, diarréias e disenterias bacterianas (como a cólera), ancilostomíase (amarelão), ascaridíase (lombriga), teníase, cisticercose, filariose (elefantíase), esquistossomose, etc, e quem mais sofre com essas doenças são as crianças: 65% das internações hospitalares de crianças menores de 10 anos estão associadas à falta de saneamento básico (BNDES, 1998), os índices de mortalidade infantil em geral caem 21% quando são feitos investimentos em

[1] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Disponível em: http://www.ibge.gov.br

saneamento básico (Jornal Folha de São Paulo, 17/dez/99) e uma criança de 0 a 4 anos morre a cada 96 minutos em nosso país por falta de saneamento básico, mais precisamente, por falta de esgoto sanitário (FUNASA – Jornal Folha de São Paulo, 16/jul/00).

Segundo FUNASA (2011), a cada R$ 1,00 (um real) investido em saneamento, economiza-se R$ 4,00 (quatro reais) em medicina curativa, e a cada R$ 1 milhão investido em obras de esgoto sanitário geram-se 30 empregos diretos e 20 indiretos, além dos empregos permanentes quando o sistema entra na fase de operação, segundo dados de estudos encomendados pelo BNDES (1998), ou seja, o aproveitamento energético dos resíduos do esgotamento sanitário, além de viabilizar a implantação de estações de tratamento, contribui para o bem-estar da sociedade, com geração de empregos e melhor qualidade de vida.

Os resíduos de esgotamento sanitários são compostos tanto de frações gasosas (biogás) quanto sólidas (lodo de esgoto), sendo que ambas representam problemas para o meio ambiente se forem descartadas sem terem sofrido o tratamento adequado. Primeiramente, este tratamento é composto por diversos processos que, em cada etapa, diminuem o poder de poluição do esgoto antes do retorno à natureza.

É objetivo do aproveitamento energético de resíduos do processo de tratamento de esgotos obter a redução de emissão de gases que contribuem para o efeito estufa utilizando-se desses gases para aumento da eficiência energética global da estação de tratamento, viabilizando o saneamento básico e melhorando o desempenho do processo de tratamento.

A preocupação da sociedade com a sustentabilidade tem gerado grandes avanços tecnológicos e em pesquisas sobre a geração de energia elétrica a partir de insumos renováveis como, por exemplo, a biomassa. O tratamento de efluentes líquidos é uma das possibilidades a serem estudadas para utilização de biomassa como fonte de energia, podendo ser utilizada em conjunto com outros tipos de fontes de energia (renováveis ou não) ou, em alguns casos, como única fonte, porém não se tem atualmente dados conclusivos sobre seu real potencial de geração de energia, uma vez que faltam dados confiáveis relacionados à coleta e ao tratamento.

Segundo Nuvolari (2003), o esgoto é um líquido cuja composição é de aproximadamente 99,87% de água; 0,04% de sólidos sedimentáveis; 0,02% de sólidos não sedimentáveis e 0,07% de substâncias dissolvidas.

Segundo Jordão e Pessôa (2009), os quatro fatores principais entre os constituintes do lodo de esgoto são: matéria orgânica; nutrientes; organismos patogênicos e metais pesados, produtos orgânicos e substâncias tóxicas. Valores típicos de matéria orgânica para lodo gerado em estações de tratamento de esgotos domésticos estão na faixa de 75 a 85% e a quantidade de nutrientes no lodo em uma relação N-P-K é da ordem de 5 a 10%.

De acordo com a literatura, podem-se considerar os seguintes valores de referência:

- Wildi (1972) cita como valores usuais de projeto de unidades de tratamento de esgoto o valor de 100 g de sólido seco por habitante por dia para o esgoto primário e secundário, ou 65 g por habitante por dia para o lodo digerido (esgoto primário contém 3 a 5 % de sólidos em massa, sendo 0% orgânico);

- Brunner (1994) estima a produção diária de lodo de esgoto à taxa de 90 g por habitante;

- Appels et al. (2008) cita a faixa entre 60 e 90 g por habitante por dia.

De acordo com o IBGE, a população do município de São Paulo é de 10,8 milhões de habitantes (SP, 2010) e se forem considerados os 38 municípios que formam a região metropolitana, esse número se aproxima de 19 milhões de habitantes. Admitindo-se para produção de esgoto o índice de 100 gramas por habitante por dia, a produção de esgoto seria de 1.080 e 1.900 t/dia na cidade e na região metropolitana, respectivamente, os quais devem necessariamente ser tratados para evitar que venham a causar agravos ambientais a veios aquíferos locais. Com dados citados por Appels et al. (2008) referente à digestão anaeróbica, a taxa de produção de gás (com concentração média de 65% de metano, densidade de 0,86 e poder calorífico de 21 a 25 MJ/m^3) varia de 0,03 a 0,04 m^3/pessoa.dia – nesse caso, de 324.000 a 432.000 m^3/dia para a população de São Paulo, ou de 3,2 a 4,3 kg/s de biogás gerado 24 horas por dia. Os números apresentados são sugestivos de interessante possibilidade de geração de energia integrada à solução do problema ambiental representado pela necessidade de dar destino adequado a tal resíduo.

O biogás gerado com o processo anaeróbico do esgoto é constituído por metano na proporção de 50 a 70%, sendo que este é 21 vezes mais poluidor do que o dióxido de carbono, sendo necessária uma alternativa para que esse gás não seja lançado diretamente na atmosfera. Uma alternativa possível é pela queima desse gás em ciclos a gás, em motores de combustão interna, em microturbinas a gás ou inseridos em processos de cogeração, gerando assim

energia elétrica que pode ser usada na própria Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) ou vendida para a concessionária, dependendo da quantidade produzida. O gás, além de gerar energia elétrica, pode ser usado para secagem do lodo e para queima nos próprios biodigestores.

Para que o uso do esgotamento sanitário para geração energética seja viável deve-se atentar para alguns fatores, dentre eles:

- a continuidade de obtenção, geração e captação do biogás, uma vez que a obtenção de esgoto e o processo de tratamento são contínuos;

- o aproveitamento energético do biogás está diretamente relacionado ao tempo gasto no tratamento do esgoto, uma vez que um tempo maior gera uma quantidade maior de biogás devido à degradação que o lodo sofre no processo anaeróbico;

- a composição e características físico-químicas do biogás, sendo algumas vezes necessária a redução do H_2S, CO_2 e da umidade, para que o gás possa ser utilizado de maneira eficiente;

- a queima do biogás é justificada também por ser uma maneira de conversão do metano presente.

Além da análise técnica, também deve ser feita uma análise econômica para verificação da viabilidade de implantação da geração de energia elétrica. Devem ser analisados os custos de implantação do projeto e compará-los com os custos de capital, de biomassa, operação e manutenção.

Neste trabalho será feita uma revisão da literatura baseada em artigos, dissertações e teses já publicadas a respeito do aproveitamento energético dos resíduos do esgotamento sanitário. É um assunto de grande interesse devido ser uma alternativa promissora para redução de emissão de gases poluentes, para o destino do esgoto (o que influencia no planejamento de cidades), para a geração de energia de maneira sustentável, para a cogeração e, consequente autossuficiência de Estações de Tratamento de Esgotos, o que viabilizaria economicamente suas instalações e poderiam ser levadas para regiões mais carentes onde este tipo de tratamento ainda não ocorre.

2 CONCEITOS BÁSICOS

2.1 PROCESSO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Os esgotos são águas residuais que podem ser de origem doméstica, fluvial ou industrial. Seus componentes são divididos em quatro grupos: matéria orgânica, sólidos em suspensão, nutrientes e organismos patogênicos. Os esgotos podem causar consequências desastrosas se jogados diretamente no meio ambiente, tais como doenças e contaminação dos recursos hídricos, por isso é necessário que passem por processos de tratamento, que visam reduzir o teor dos agentes contaminantes de modo que quando jogados na natureza não apresentem impacto. Segundo Van Haandel e Lettinger (1994), "o objetivo principal do tratamento de esgoto é corrigir suas características indesejáveis de tal maneira que seu uso ou disposição final possa ocorrer de acordo com as regras e critérios definidos pelas autoridades regulamentadoras".

O processo de tratamento de esgoto consiste das seguintes etapas (COSTA, 2006):

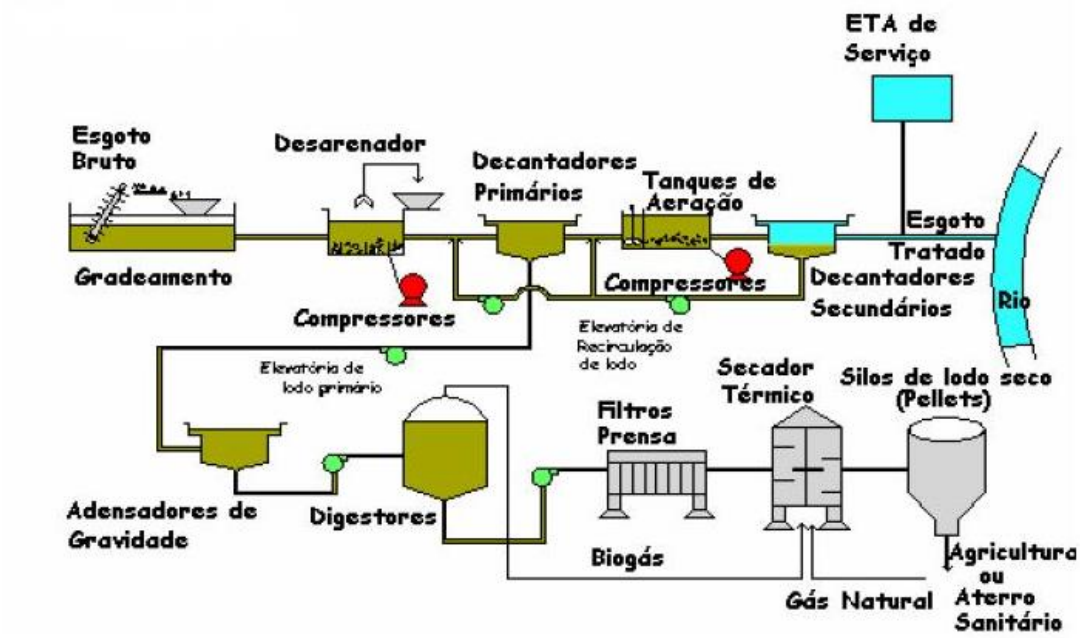
- Através de um sistema de "gradeamento" detêm-se sólidos de tamanhos maiores que existam no esgoto, tais como galhos e outros objetos, que podem ter sido jogados intencionalmente ou arrastados pela água;
- Para retirada dos sólidos granulares o esgoto passa por um sistema de "caixas de areia";
- Nos decantadores primários os materiais sólidos ainda existentes sedimentam no fundo do tanque, porém algumas partículas são tão pequenas e leves que não conseguem sedimentar sozinhas, sendo então necessário acrescentar uma substância coagulante, a fim de que essas partículas menores se juntem e consigam por fim sedimentar. Esse resíduo sedimentado é o chamado "lodo de esgoto";
- O lodo é retirado do tanque é encaminhado para adensadores por gravidade e digestores anaeróbicos, onde sofrem redução de 35-45% dos seus sólidos voláteis, sendo, então, desidratado e encaminhado para filtros prensas para que reduções maiores de volume ocorram. Ao término dessas etapas o lodo pode ser encaminhado para a agricultura para sua utilização como fertilizante, quando permitido, ou para aterros sanitários. Nos digestores é que ocorre a produção de biogás através da

decomposição da matéria orgânica pelas bactérias anaeróbicas, sendo que este biogás pode ser utilizado como combustível para geração de energia ou para secagem do lodo na própria estação de tratamento. Vale ressaltar que, segundo Van Haandel (1994), é mais interessante se utilizar processos anaeróbicos para decomposição do lodo do que aeróbicos, uma vez que geram menor volume de lodo (97% do aeróbico contra 30% do anaeróbico) além de geração de energia com a produção de biogás;

- A água resultante do tratamento pode ser utilizada para fins não nobres, como industriais, ou descartada diretamente nos rios.

A figura 1 apresenta as etapas de tratamento do esgoto dentro de uma estação de tratamento, desde a chegada do esgoto bruto até o retorno do esgoto já tratado para os rios e utilização do lodo para agricultura ou aterro sanitário.

Figura 2 – Etapas de tratamento de esgoto



Fonte: (COSTA, 2006)

Segundo Lamas (2007) as principais características do esgoto e de seu processo de tratamento são descritas como:

- Demanda química de oxigênio (DQO): tem o objetivo de medir a quantidade necessária de oxigênio para oxidar quimicamente a matéria orgânica.

- Demanda bioquímica de oxigênio (DBO): tem o objetivo de medir a carga de poluentes de uma água residual, que contém inúmeros poluentes compostos de muitos e variados tipos de materiais orgânicos e inorgânicos que são difíceis de serem mensurados individualmente.
- Tempo de retenção hidráulica: é o período de tempo que os esgotos permanecem dentro do tanque, dado pela relação entre o volume do tanque e a vazão de afluente.
- Aeração: é o processo de inserção de ar em um líquido, essa operação visa fornecer o oxigênio necessário para os micro-organismos se desenvolverem nos lodos ativados provocando a agitação e homogeneização suficiente para assegurar o contato entre os elementos poluentes e o oxigênio introduzido.
- Oxigênio dissolvido (OD): indica o grau de arejamento da água onde sua presença é importante para a sobrevivência dos seres aquáticos aeróbios e sua ausência propicia a vida dos micro-organismos anaeróbios.
- Potencial de hidrogênio (pH): o monitoramento do potencial de hidrogênio de uma água permite avaliar seu poder de corrosão, da quantidade de reagentes necessários à coagulação e do crescimento de micro-organismos. Com o intuito de aumentar a eficiência do processo de desinfecção da água, é recomendado manter o pH da mesma um pouco abaixo de sete, porém, a água em condição de reuso pode ter seu valor de pH entre seis e nove e meio.
- Turbidez: indica a presença de pequenas partículas em suspensão, matérias orgânicas e inorgânicas finamente divididas, plâncton e outros micro-organismos. A sua medida é realizada pela comparação da intensidade em uma amostra padrão. Quanto maior seja a intensidade da luz espalhada, maior será a turbidez.
- Total de sólidos dissolvidos (TSD): é um parâmetro que corresponde ao peso total das substâncias dissolvidas na água, incluindo matéria orgânica, minerais e outras substâncias inorgânicas, voláteis ou não, por unidade de volume.

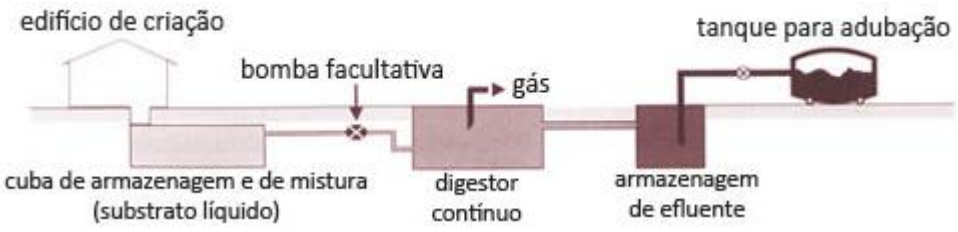
2.2 BIOGÁS

O biogás é o produto da biodigestão de compostos orgânicos, sendo que o biodigestor é o sistema utilizado para sua produção, que se constitui de uma mistura de gases combustíveis, cujo principal gás é o metano (CH_4), produzido por bactérias que digerem

matéria orgânica em condições anaeróbicas (isto é, em ausência de oxigênio) na degradação de polímeros orgânicos derivados de matéria biodegradável, como; resíduos alimentícios, lodo de esgoto, lixo doméstico, substrato da cana-de-açúcar, vinhaça, esterco orgânico, plantas aquáticas, efluentes industriais e demais resíduos agrícolas. Nesse caso, quando a digestão anaeróbia é realizada em biodigestores especialmente planejados, a mistura gasosa produzida pode ser usada como combustível, o qual, além de não produzir gases tóxicos durante a queima e de ser uma ótima alternativa para o aproveitamento do lixo orgânico, ainda deixa como resíduo um lodo que é um excelente biofertilizante (COLLARES PEREIRA, 1998).

Existem basicamente dois tipos de biodigestores: os contínuos e descontínuos. Segundo Costa (2006), em um sistema contínuo, a matéria orgânica é introduzida na cuba de fermentação, com uma determinada taxa de diluição (a qual depende do tipo de matéria orgânica a fermentar), onde fica retida durante vários dias. O tempo de retenção resulta de um compromisso entre o volume de gás a produzir, o grau de digestão que se pretende e a temperatura de funcionamento. Depois de carregada a cuba e iniciada a fermentação, impõe-se a estabilização do sistema. É imperativa a verificação de todos os parâmetros como o pH, temperatura, qualidade do efluente, produção e qualidade do gás. A figura 2 apresenta um esquema com utilização de biodigestor contínuo.

Figura 3 – Biodigestor contínuo



Fonte: http://www.cerpch.unifei.edu.br/biodigestor.php

Ao contrário do sistema contínuo, o funcionamento do sistema descontínuo não é regular, assim, a cuba de fermentação é totalmente carregada periodicamente. Neste processo, o fator diluição não é considerado um problema, já que a matéria orgânica é fermentada praticamente sem adição de água. O processo inicia-se com uma fase de fermentação aeróbia, fortemente exotérmica, que permite a degradação das moléculas pouco polimerizadas e que podem ser um fator de acidificação do meio. A duração desta fermentação é de 2 a 8 dias,

seguindo-se a fermentação anaeróbia durante um período de 30 a 40 dias. Neste tipo de fermentação a temperatura é um fator menos crítico. Em relação aos outros fatores, pouco se poderá fazer durante a fermentação. Se houver problemas durante o processo, a melhor opção é começar novamente. No entanto, a experiência, segundo Costa (2006), diz que se trata de um processo simples, que normalmente funciona bem. A produção de gás é irregular e o volume produzido é da ordem dos 60 m^3 por tonelada de matéria bruta. A figura 3 apresenta um esquema de funcionamento de um biodigestor descontínuo.

Figura 4 – Biodigestor descontínuo

Fonte: http://www.cerpch.unifei.edu.br/biodigestor.php

Atribui-se o nome de biogás à mistura gasosa, combustível, resultante da fermentação anaeróbica da matéria orgânica. A proporção de cada gás na mistura depende de vários parâmetros, como o tipo de biodigestor e o substrato a digerir. De qualquer forma, essa mistura é essencialmente constituída por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), estando o seu poder calorífico diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa. O biogás pode ser proveniente de resíduos sólidos ou líquidos, de origem rural, urbano e industrial (CENBIO, 2004).

O biogás é uma mistura dos seguintes gases (ALVES, 2000):

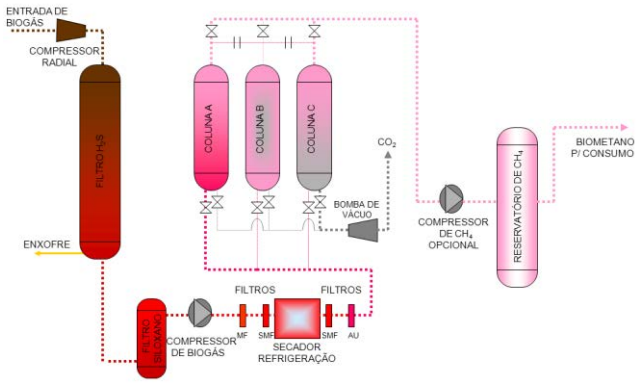
- Metano (CH_4): de 50 a 90% vol;
- Gás carbônico de (CO_2): 10 a 50% vol e
- Outros gases: de 1 a 5% vol, divididos em: hidrogênio (H_2): de 0 a 1% vol, gás sulfídrico (H_2S): de 0 a 3% vol e oxigênio (O_2) + nitrogênio (N_2): de 0 a 1% vol.

A relação entre massa e volume do CH_4 puro é de 0,5 kg/Nm^3. Energeticamente o biogás purificado corresponde ao GNC (Gás Natural Combustível), sendo que seu poder calorífico é menor quanto maiores forem as proporções de contaminantes na mistura que o compõe. Em linhas gerais este poder calorífico é igual a 5.000 kcal/Nm^3 (para biogás com

60% de CH_4 e 40% de CO_2), o que corresponde a um litro de óleo Diesel (ETSU apud ALVES (2000)[2].

O biogás produzido deve passar por um processo de purificação, principalmente caso venha a ser usado posteriormente em um sistema de conversão em energia elétrica. Geralmente esse sistema de purificação é composto por dois compartimentos instalados na linha de captação do gás. Antes de o biogás ser alimentado neste sistema, passa por um recipiente onde fica retida a água condensada durante sua passagem pela tubulação. O primeiro compartimento é composto por dois tipos de peneira molecular, uma delas visa à retirada da umidade e a outra a retirada do ácido sulfídrico (H_2S), sílica gel azul, utilizada como indicador, pois quando saturada, forma uma coloração diferente. O segundo contém cavaco de ferro, visando assegurar a retirada de H_2S, que possivelmente não tenha reagido com o primeiro elemento. A eficiência de um sistema de purificação se comprova pelo decréscimo significativo das concentrações do sulfeto de hidrogênio e água (PECORA, 2006). A figura 4 apresenta um esquema de purificação de biogás desde a entrada do biogás vindo dos biodigestores até a retirada do biogás pronto para consumo.

Figura 5 – Sistema de purificação de biogás



Fonte: http://www.januspergher.com.br/purificador.pps

[2] ETSU, Landfill gas - Development guidelines, first publish, Department of Trade and Industry, Inglaterra, 1.996 – apud ALVES, J. W. S. **Diagnóstico Técnico Institucional da Recuperação e Uso Energético do Biogás Gerado pela Digestão Anaeróbica de Resíduos**. Dissertação de Mestrado, PIPGE/USP, São Paulo, 2000.

.

Após a purificação do biogás, este pode ser queimado em queimadores convencionais, conhecidos como *flares*, ou pode ser utilizado para geração de energia elétrica e energia térmica, ambas podendo ser utilizadas pelos próprios biodigestores que produzem o biogás.

A conversão energética do biogás se apresenta como uma alternativa para a redução da emissão de metano, além da obtenção de energia elétrica.

São fatores que influenciam na produção de biogás (FRANÇA JUNIOR, 2008):

- Natureza do substrato: Os substratos devem servir aos microorganismos para realização da decomposição da matéria orgânica e formação do biogás, sendo que alguns destes elementos (chamados oligoelementos) ajudam nas reações enzimáticas como, por exemplo, cálcio, magnésio, potássio, sódio, ferro, zinco, cobalto, molibdênio, cobre e manganês, além do carbono, nitrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre que auxiliam para um maior rendimento dos gases de fermentação;
- Composição dos resíduos: Quanto maior a quantidade de matéria orgânica no resíduo, maior é a capacidade de geração de biogás, sendo que os principais nutrientes contidos são nitrogênio, carbono e sais orgânicos;
- Teor de água: Entre 60 % a 90 % do peso do conteúdo total;
- Temperatura: A temperatura tem uma influência muito grande no processo enzimático das bactérias formadoras de metano visto que a 10 °C a atividade das bactérias é muito baixa e acima de 65 °C as enzimas são destruídas pelo calor. A faixa ideal para a produção de biogás está entre 32 e 37 °C para bactérias mesofílicas e de 50 a 60 °C para bactérias termofílicas, e;
- Impermeailização do ar.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Para elaboração deste trabalho foi consultada literatura especializada de modo a se obter conceitos sobre esgotos, tratamento de esgotos, biogás, biodigestores, tecnologias de conversão de biogás em energia elétrica ou uso de cogeração e o que tem sido estudado para que haja um avanço tecnológico para esse tipo de aproveitamento energético.

Tassou (1988) realiza análise em uma estação de tratamento no sudeste da Inglaterra com uso de motores de combustão interna para geração de calor e vapor com uso do biogás obtido do esgoto com uso de biodigestores. Com os dados da estação pode-se observar que o sistema com motores de combustão interna gerava energia suficiente para prover 68% da energia elétrica requerida pela planta, além de que o período de pay-back seria de 3 anos. No artigo consta que instalações pilotos estavam sendo avaliadas pelo mercado, pois, na ocasião, os aspectos econômicos ainda não tinham sido provados como atraentes.

Alves, Borges, Manso, De Lucas e Zulauf (2001) fazem uma análise geral sobre o uso do biogás e suas vantagens para a sociedade, para o governo, para as estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários e para o meio ambiente. Justifica o uso do biogás para geração de energia elétrica devido às vantagens que podem ser obtidas, como a descentralização da geração, permite aos sistemas de tratamento obter economia e às prefeituras vender o excedente da carga para as concessionárias, geração de empregos e subempregos, permite cogeração (energia elétrica e calor), redução da emissão de metano e de uso de combustíveis fósseis, entre outras. Cita as tecnologias mais utilizadas: motor de combustão interna operando em ciclo Otto, turbinas a gás e microturbinas a gás e aponta um problema ainda existente: essas tecnologias para serem utilizadas precisam ser adaptadas para o uso de biogás, o que já é feito em outros países como na Alemanha e Itália, porém por serem tecnologias importadas, acabam por serem mais caras, ou seja, se faz necessário no país o estabelecimento de políticas de incentivo ao uso do biogás de modo a nacionalizar essas tecnologias de conversão e assim diminuir o custo.

Pecora, Velasquez, Coelho e Abreu (2006) apresentam estudo realizado na USP (projeto PUREFA) para tratamento gerado no conjunto residencial e no principal restaurante do campus, com produção estimada de 5,3 m^3/dia. Foi utilizado um grupo motor-gerador de baixa potência (18 kW) da empresa Comercial Diesel Parts, porém foram encontradas

algumas dificuldades para seu uso, como vazão do biogás inconstante e pressão muito baixa e sensível.

Velasquez, Coelho, Martins e Abreu (2006) apresentam estudo realizado na ETE de Barueri, que tem produção média de 24000 m^3/dia. As tecnologias de conversão mais utilizadas são: motores de combustão interna operando em ciclo Otto (mais eficientes para conversão elétrica) e turbinas a gás (maior eficiência global quando se trata de cogeração). A purificação do biogás é de grande importância e foi feita de modo a atender os requisitos técnicos mínimos da microturbina de 30 kW (ISO) da Capstone. Analisando-se economicamente, é mais viável o uso de grupos moto-geradores de 30 kW (Trigás), pois apresentam metade do custo quando comparado com microturbinas de 30 kW (Capstone), já que não necessitam de sistema de purificação e compressores, porém as microturbinas são melhores do ponto de vista ambiental, já que emitem muito menos NOx.

Costa (2006) realiza um estudo na ETE de Barueri no projeto "Ener-Biog" comparando-se o uso de microturbinas e motores para a mesma faixa de potência de 30 kW para aproveitamento do biogás obtido com o esgotamento sanitário. O estudo conclui que nas ETEs existe um ganho de 20% no consumo de energia devido ao alto consumo dos equipamentos, o que já pode ser considerado um ganho significativo, e atenta para o fato de que o biogás deve apresentar composição e características adequadas à tecnologia de conversão que vai ser empregada (no caso de microturbinas o processo de purificação do biogás tinha que ser mais rigoroso utilizando-se de um sistema de purificação e compressores que atendem-se as necessidades da microtubina Capstone).

Lamas (2007) faz uma análise técnica e econômica comparando mini-ETEs que possuem autossuficiência energética com as que não possuem essa autosuficência e com os sistemas convencionais disponíveis no mercado. Em todas as análises as mini-ETEs se mostraram mais atraentes do que os sistemas convencionais, devido aos seguintes fatores: todos os produtos gerados podem ser utilizados, tais como energia elétrica para alimentar o aerador e a bomba de distribuição de água de re-uso, lodo como biofertilizante, biogás para queima em motores e água tratada, além de que o tempo de retorno do capital investido é de menos de 2 anos para mini-ETE com autossuficiência, de 3 a 5 anos para mini-ETE sem autossuficiência energética e entre 5 e 10 anos para o sistema disponível no mercado.

França Junior (2008) faz um estudo do aproveitamento energético a partir do biogás obtido com o tratamento de esgotos de uma população de um milhão de habitantes e faz uma análise técnica, econômica e termoeconômica utilizando-se do programa IPSEpro® comparando um ciclo combinado com turbina a gás e turbina a vapor com um ciclo combinado com motor de combustão interna e turbina a vapor, sendo que em ambos os casos ocorre cogeração, com geração de energia elétrica e geração de vapor para ser utilizado na secagem do lodo. Chega-se a conclusão de que, apesar dos custos dos equipamentos do ciclo combinado com motor de combustão interna ser menores do que os com turbina a gás, este último é mais viável economicamente por permitir a geração de uma quantidade maior de energia elétrica, por ser mais eficiente e por gerar uma receita maior com a comercialização de créditos de carbono. No entanto, observou-se também que a planta não é autossuficiente devido ao elevado consumo de energia dos equipamentos e que não existe muita tecnologia disponível no mercado para a conversão do biogás, sendo necessária a importação das tecnologias, gerando um custo maior.

Bruno, Ortega-López e Coronas (2008) realizam um estudo em que se analisa o uso de microturbinas a gás em um sistema de trigeração, com geração de energia elétrica, calor para o processo e água resfriada. Faz uma análise do uso de chillers combinado com o uso das microturbinas, sendo que a água gelada pode ser usada tanto para condensar água no processo de pré-tratamento do biogás quando para resfriar o ar de combustão das microturbinas. Foi feito um estudo de caso na planta de estação de tratamento de esgotos de Reus (Espanha) que produz biogás a 105 Nm^3/h a 35 ^oC e 1,2 bar, o calor obtido com a microturbina é usado para reduzir a energia gasta para aquecer os biodigestores e para produzir água gelada que resfriará o biogás e o ar de entrada da microturbina, além de se obter também geração de energia elétrica. Dentre as configurações analisadas no estudo, se observou que o melhor aproveitamento era daquelas que utilizavam na planta de trigeração todo o biogás obtido no tratamento do esgoto e gás natural como adicional para atender as demandas de calor da planta, sendo que a melhor configuração era a que utilizava microturbinas com biogás e gás natural com sistema de resfriamento aproveitando gases de exaustão de duplo efeito água/LiBr conectados em paralelo.

Pecora, Velasquez e Coelho (2009) apresentam estudo realizado no aterro sanitário da Essencis da CTR Caieiras e que optou pela instalação de um motogerador ciclo Otto adaptado com potência nominal de 200 kW, sendo justificada a sua escolha por apresentar baixo custo,

alta eficiência, rápida instalação e facilidade de manutenção, quando comparado com outras tecnologias de conversão. Além do motogerador, foram instalados 7 postes de iluminação a gás com 4 pontos luminosos cada um, sendo que estes foram alimentados com o biogás obtido do aterro. Para a previsão feita em 2009, o biogás gerado no aterro seria suficiente para abastecer o motogerador, os postes de iluminação e ainda geraria um excedente que continuaria sendo queimado em *flares*.

Godoy Junior (2010) realiza estudo na UNESP de Guaratinguetá com a implantação de uma mini-estação ecoeficiente de tratamento de esgoto e reuso de águas. Para o aproveitamento energético do biogás, foram sugeridas 3 medidas, sendo elas o armazenamento deste biogás em gasômetros, a purificação deste biogás com a filtragem do gás sulfídrico existente com uso de um filtro de óxido de ferro e a conversão energética do biogás com o uso de um motogerador acoplado a um trocador de calor gás/água na forma de minicaldeira, sendo que com a análise feita com gás natural de baixa pressão com pressão de 0,1 MPa e 95% de metano, obteve-se uma potência média de saída de 4,2 kW. Ao se analisar economicamente os processos de tratamento do esgoto, pode-se observar que o que utiliza lodo ativado convencional é inviável, pois a receita é sempre negativa (além de gerar mais lodo, o que não é desejável), com o uso de UASBs (*Up Flow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*) seguido de pós-tratamento por lodo ativado o investimento se amortiza de sete meses e com o uso de UASBs seguido de pós-tratamento por lodo ativado e associado ao sistema de cogeração o investimento se amortiza em sete anos, isso porque a tecnologia de conversão precisa ser adaptada para o uso de biogás e gera um custo maior.

Lopes, Portugal, Portugal Junior e Guedes (2011) realizam estudo na ETE de Passos-MG e este estudo indica uma média de geração de metano de aproximadamente 122 m^3/h e que os grupos geradores que atenderiam ao projeto apresentam potência de 60 kVA, para uma produção de energia durante 24 h ou 120 kVA, para uma produção de energia de 12 h. Para utilização do motor-gerador de 120 kVA é necessário um balão ou gasômetro para acumulação do biogás. O estudo de viabilidade mostrou que o payback é de 4 e 11 meses, respectivamente, para cada uma das opções de motor-gerador, ou seja, menos de um ano de retorno, o que se torna muito interessante também do ponto de vista econômico.

Em resumo, o que se encontra na literatura sobre as tecnologias utilizadas para o aproveitamento energético do biogás pode ser observado na figura 6, em que constam os

valores de potência instalada, rendimento elétrico e emissões de NOx, servindo para comparação entre as diferentes tecnologias.

Figura 6 – Comparação entre as tecnologias

Tecnologia de Conversão	Potência Instalada (kW)	Rendimento Elétrico (%)	Emissões de NO_x (ppm)
Motores a Gás (Ciclo Otto)	30 – 20.000	30 – 40	250 – 3.000
Motores a Diesel (Biogás + Diesel)	30 – 20.000	30 – 35	27
Turbinas a Gás (Médio Porte)	500 – 150.000	20 – 30	35 – 50
Micro-turbinas a Gás (Pequeno Porte)	30 – 100	24 – 28	< 9

Fonte: Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO (2004)

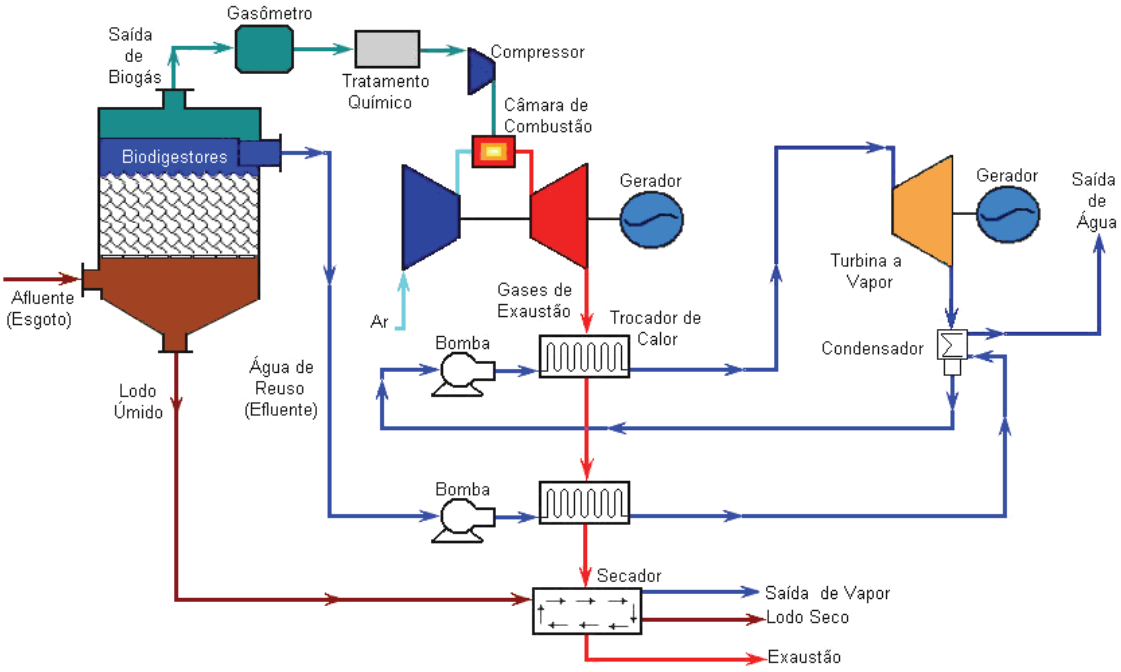
4 CONCEPÇÕES DE PROJETO

Com base na revisão feita da literatura podem-se definir algumas concepções de projeto, obtendo-se valores de referência.

4.1 USO DE TURBINAS E MICROTUBINAS

Segundo França Junior (2008) com o uso de turbinas e microturbinas, a configuração apresentada nas estações de tratamento de esgoto seria conforme apresentado na figura 5:

Figura 7 – Aproveitamento energético com uso de turbinas/microturbinas



Fonte: (FRANÇA JUNIOR, 2008)

Com o uso da microturbina no Brasil e no mundo, apresentam-se as seguintes ocorrências com os valores de projeto, possíveis de serem encontrados:

4.1.1 Planta de Tratamento de Esgoto de Chiquita (Santa Margarida – Estados Unidos)

Em operação desde 2002, esta planta de tratamento de esgotos opera com quatro microturbinas Capstone de 30 kW cada uma, conforme apresentado na figura 6 em que se visualiza as microturbinas implantadas na planta, utiliza aproximadamente 3000 m^3 de biogás por dia e produz cerca de 2500 kW por dia. Os gases de exaustão da microturbinas são capturados e utilizados para aquecer os tanques digestores a 38°C, o que reduz o uso de aquecedores e, consequentemente, o uso de energia na planta. As quatro microturbinas produzem entre 10 e 15% da energia necessária para manter a planta.

Figura 8 – Microturbinas da Planta de Tratamento de Esgotos de Chiquita

Fonte: http://www.epa.gov/region9/waterinfrastructure/features/chiquita.html

4.1.2 Planta de Tratamento de Esgoto de Sheboygan (Estados Unidos)

Opera desde fevereiro de 2006 com dez microturbinas Capstone de 30 kW e desde dezembro de 2010 conta com mais 2 microturbinas Capstone de 200 kW e tem capacidade de tratar aproximadamente 44670 m^3 de esgotos por dia.

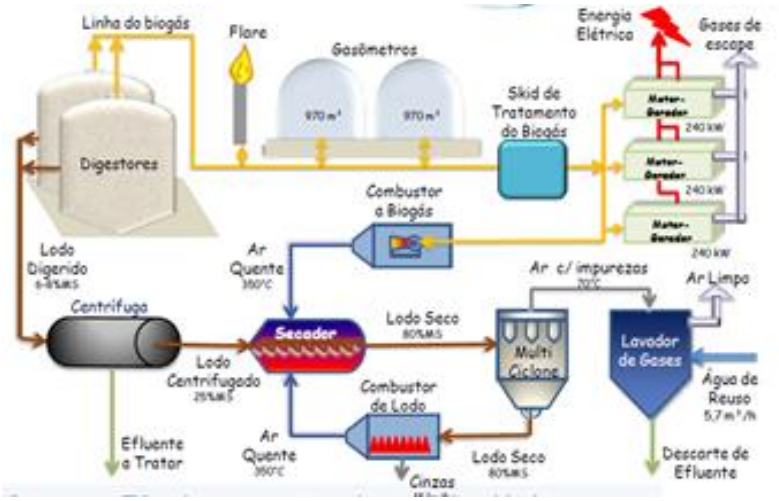
4.1.3 Planta de Tratamento de Esgoto de Allentown (Estados Unidos)

Trata aproximadamente 121 m^3 por dia de esgotos e opera com treze microturbinas Capstone de 30 kW e três unidades de recuperação de calor, com eficiência total da cogeração de 58%. Quando o ciclo de cogeração opera com toda a capacidade produz 26% das necessidades elétricas da planta.

4.1.4 Estação de Tratamento de Esgotos Arrudas (Brasil)

Esta planta está localizada em Sabará, na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, e opera com capacidade de tratar 3,375m^3/s de esgotos. O sistema é composto por armazenamento do biogás, tratamento e condução do gás tratado para três conjuntos de quatro microturbinas de 200 kW cada. O calor dos gases de exaustão das microturbinas é utilizado em trocadores de calor para aquecer o lodo proveniente dos biodigestores, num circuito fechado, aumentando a temperatura média no interior dos mesmos, otimizando a digestão e aumentando a produção do biogás que alimenta as microturbinas. A figura 7 apresenta todas as etapas, a partir da saída do biogás dos digestores, que ocorrem na estação de tratamento.

Figura 9 – Uso de microturbinas na Estação de Tratamento de Esgoto Arrudas

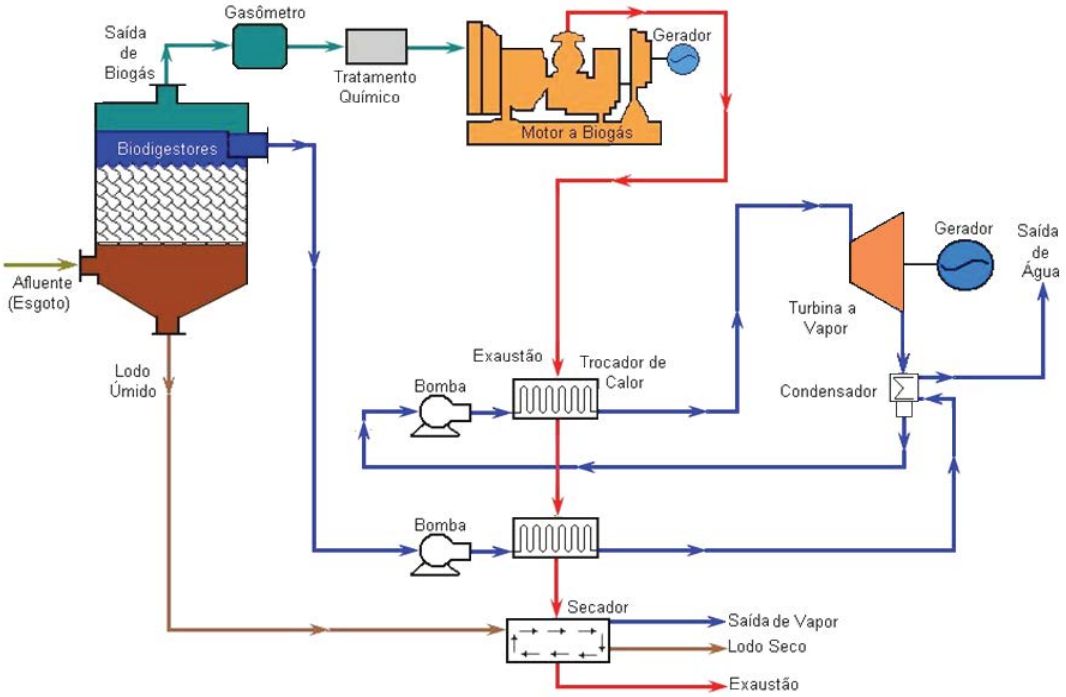


Fonte: (COPASA, 2011)

4.2 USO DE GRUPOS MOTO-GERADORES

Segundo França Junior (2008) com o uso de motores a biogás, a configuração apresentada nas estações de tratamento de esgoto seria a apresentada na figura 8:

Figura 10 – Aproveitamento energético com uso de motores a biogás



Fonte: (FRANÇA JUNIOR, 2008)

Podem ser encontradas também ocorrências do uso de grupos moto-geradores com o uso de biogás para geração de energia elétrica e para cogeração:

4.2.1 Planta de Tratamento de Esgoto Point Loma (Estados Unidos)

A planta trata aproximadamente 662 mil m^3 de esgotos por dia gerados pelos mais de 2,2 milhões de residentes. O biogás gerado na planta é removido dos biodigestores e utilizado

em dois motores Caterpillar de 2,3 MW cada um que suprem toda a necessidade de energia elétrica da planta e ainda gera excedentes que são vendidos para a concessionária.

4.2.2 Planta de Tratamento de Esgoto de Portland Columbia Boulevard (Estados Unidos)

A planta trata em média 276000 m^3 de esgotos por dia e opera desde 2009 com dois motores GE/Jenbacher de 850 kW, com uma capacidade total de geração de 1,7 MW por hora. A planta recupera o calor dos gases de exaustão para uso nos digestores anaeróbicos. Os motores proporcionam 40% das necessidades elétricas da planta.

4.2.3 Planta de Tratamento de Esgotos de Seafield (Escócia)

A planta gera 1150 m^3 por dia de lodo de esgoto e 24000 m^3 por dia de biogás contendo 62% de metano. Nesta planta são utilizados motores a gás que operam tanto com biogás quanto com gás natural. São utilizados 3 motores em cogeração com capacidades de: 1,27 MW, 1,06 MW e 1,19 MW.

4.2.4 Planta de Tratamento de Esgotos de Santiago (Chile)

A planta trata aproximadamente 760320 m^3 de esgotos por dia e utiliza três motores a biogás Jenbacher J620 de 2.7 MW de modo a produzir 60% da energia necessária para a própria planta.

4.2.5 Planta de Tratamento de Esgotos de Psyttalia (Grécia)

Esta planta trata aproximadamente 730000 m^3/dia de esgoto e o lodo seco gerado (entre 120 e 150 toneladas por dia com 92% de matéria seca) é utilizado nas fábricas de cimento e

para geração de energia. O biogás produzido é utilizado em duas plantas de cogeração totalizando 11,4 MW e adicionalmente existe uma planta de cogeração de 12,9 MW utilizando gás natural que é responsável por gerar calor para secagem do lodo. As plantas de cogeração com utilização de biogás são: de 7,14 MW em três motores a gás e de 4,25 MW em dois motores a gás.

4.2.6 Planta de Tratamento de Esgotos de Hamilton, Ontario (Canadá)

A planta trata 409000 m^3 de esgotos por dia e utiliza para cogeração um motor a gás Caterpillar G3520 de 1600 kW de capacidade elétrica, conforme apresentado na figura 9, e 1538 kW de capacidade térmica. A cogeração gera calor para ser utilizado nos biodigestores e contribui para que haja redução da operação das caldeiras utilizadas para este propósito.

Figura 11 – Motor a gás da Estação de Tratamento de Esgotos de Ontario, Canadá

Fonte: http://www.hamilton.ca/NR/rdonlyres/FAE4414B-09FD-4F3B-9A55-FC31E568962B/0/20120110161327.pdf

4.2.7 Planta de Tratamento de Esgotos de East Bay (Estados Unidos)

Esta planta tem capacidade de tratar 1,57 milhões de m^3 de esgoto por dia e possui uma capacidade de cogeração instalada de 7,1 MW. Possui três moto-geradores de 2,368 kW cada um, porém só opera com dois ao mesmo tempo, e gera metade da energia necessária para a

planta. A energia térmica é recuperada dos motores e utilizada para manter a temperatura necessária no biodigestor.

4.2.8 Planta de Tratamento de Esgotos de Gresham (Estados Unidos)

A planta trata aproximadamente 49000 m^3 de esgotos por dia e utiliza motor Caterpillar que gera 395 kW de energia elétrica e a cogeração produz aproximadamente 55% das necessidades energéticas da planta.

4.2.9 Estação de Tratamento de Esgotos Ouro Verde (Brasil)

Localizada em Foz do Iguaçu, Paraná, a estação trata uma vazão média de 4000 m^3 de esgoto por dia e produz 80 m^3 de biogás por dia com 67% de metano através de degradação anaeróbica. A combustão do biogás ocorre em um grupo moto-gerador GET modelo GVW 25 de potência 25 kVA e produz 1350 kWh/mês. A figura 10 apresenta o grupo moto-gerador em uso na Estação de Tratamento de Esgotos Ouro Verde.

Figura 12 – Grupo moto-gerador da Estação de Tratamento de Esgotos Ouro Verde

Fonte: (SANEPAR, 2010)

4.3 OUTRAS FORMAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Existem, além da cogeração com uso de microturbinas e grupos moto-geradores, outras opções possíveis para aproveitamento energético dos resíduos do esgotamento sanitário sendo aplicadas e estudadas no mundo:

4.3.1 Unidade de tratamento de esgoto de Oxfordshire (Reino Unido)

O biogás é limpo e introduzido na rede de gás. Ele leva cerca de 20 dias a partir da descarga para produzir gás renovável suficiente para abastecer até 200 casas. Se todas as 9.600 instalações de tratamento de resíduos do Reino Unido processasse similarmente esgoto de toda a população poderia atender a demanda de gás anual de mais de 200.000 casas. Um estudo realizado pela rede nacional indicou que até 15 por cento das necessidades de gás domésticos poderiam ser satisfeitas por biometano até o ano de 2020.

4.3.2 Utilização de células combustíveis microbianas para geração de energia

Uma pesquisa realizada pela Universidade do Estado de Oregon descobriu melhores formas de produzir energia elétrica a partir de esgoto utilizando células de combustível microbianas que podem ser usados para produzir eletricidade diretamente a partir de águas residuais. Com a estimativa de produzir de 10 a 50 vezes a eletricidade, por volume, do que as abordagens comparáveis. Ao adotar uma série de novos conceitos, incluindo a redução do espaçamento entre ânodo - cátodo, usando micróbios e novos materiais de separação, os pesquisadores dizem ter sido capazes de produzir células que produzem mais de dois kilowatts por metro cúbico de volume do reator líquido. Os pesquisadores apontam que essa potência é muito maior do que a que tem sido alcançada e que essa nova tecnologia poderia substituir amplamente o processo de "lodo ativado", que tem sido usado por quase um século.

4.3.3 Unidade de tratamento de esgoto de Copenhague (Dinamarca)

Em operação desde 2011, uma unidade de incineração de leito fluidizado de lodo de esgoto trabalha em conjunto com um sistema de limpeza dos gases de combustão gera calor de alta temperatura da caldeira e esse calor é usado pela primeira vez para a pré-secagem do lodo e o resto do mesmo, mais a energia a partir da condensação do gás, é utilizado para o aquecimento da região de Copenhague. Assim, a energia gerada a partir da água residual é usada para aquecimento em milhares de apartamentos, principalmente em Copenhague e Frederiksberg. Apresenta uma capacidade de produzir 2,35 toneladas de sólidos secos por hora, a produção da caldeira é de 3,8 MW (usada para a secagem do lodo e para o aquecimento urbano), energia de condensação do gás é de 2,8 MW (usada para o aquecimento urbano), a produção de biogás em biodigestores é de 900 Nm^3/h (usada para a produção de gás de cidade) e a maior parte dos resíduos (cinzas) podem ser utilizadas como material de construção.

A figura 13 apresenta as tecnologias encontradas no Brasil e no mundo com a vazão tratada e a potência de cada Estação de Tratamento.

Figura 13 – Concepções de projeto

Tecnologia	Local de uso	Vazão tratada	Potência
Microturbina	Santa Margarida - EUA	3000 m^3/d biogás	4x 30 kW
Microturbina	Sheboygan - EUA	44670 m^3/d esgoto	10x 30 kW + 2x 200 kW
Microturbina	Allentown - EUA	121 m^3/dia esgoto	13x 30 kW
Microturbina	Arrudas - Brasil	3,375 m^3/s esgoto	4x 200 kW
Motores	Point Loma - EUA	662000 m^3/d esgoto	2x 2,3 MW
Motores	Portland Columbia - EUA	276000 m^3/d esgoto	2x 850 kW
Motores	Seafield - Escócia	24000 m^3/d biogás	1,27 MW + 1,06 MW + 1,19 MW.
Motores	Santiago - Chile	760320 m^3/d esgoto	3x 2,7 MW
Motores	Psyttalia - Grécia	730000 m^3/d esgoto	3x 7,14 MW 2x 4,25 MW
Motores	Ontario - Canadá	409000 m^3/d esgoto	1,6 MW
Motores	East Bay - EUA	1,57 mi de m^3/d esgoto	7,1 MW
Motores	Gresham - EUA	49000 m^3/d esgoto	395 kW
Motores	Ouro Verde - Brasil	80 m^3/d biogás	25 kVA

Fonte: Autoria própria

5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

É possível realizar uma comparação entre o que é descrito na literatura e o que pode ser encontrado na realidade das estações de tratamento de esgotos.

Na utilização de microturbinas é possível verificar a predominância de microturbinas Capstone de 30 kW, sendo que estas podem ser encontradas na literatura no projeto "Energ-Biog" realizado pela CENBIO para aplicação na ETE de Barueri em São Paulo e, mesmo a literatura indicando que este tipo de tecnologia é economicamente inviável quando comparado com os motores de combustão interna apesar de ser melhor do ponto de vista ecológico pela pouca quantidade de emissão de NOx, ela tem aplicação real em algumas plantas de tratamento dos Estados Unidos.

Na utilização de grupos moto-geradores existe uma variedade maior de fabricantes (tendo sido o mais encontrado Caterpillar) e de faixas de potência, dependendo da capacidade de cada planta de tratamento.

Pode-se observar que existem mais plantas utilizando grupos moto-geradores do que microturbinas e que a cogeração ocorre em todos os casos, tem a geração de energia elétrica utilizando a tecnologia apresentada e o aproveitamento dos gases de exaustão para geração de energia térmica que é, em geral, feita para manter a temperatura necessária nos biodigestores.

Além dos casos de geração de energia elétrica com microturbinas e motores, foram encontrados casos de uso do biogás após limpeza para calefação em residências em países do Reino Unido e Dinamarca e uso dos resíduos para geração de energia elétrica em células combustíveis, mostrando que existem outras formas de aproveitamento energético dos resíduos de esgotamento sanitário e que existem pesquisas ainda sendo feitas para descobertas de novas formas de aproveitamento.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho verificam-se as tecnologias existentes no mercado para aproveitamento energético dos resíduos de esgotamento sanitário, sendo que estes são armazenados em biodigestores e geram biogás, que pode ser utilizado em conjuntos de turbinas, microturbinas ou motores a biogás para gerar energia elétrica e calor.

Na literatura observa-se que as microturbinas são economicamente inviáveis quando comparadas com os motores a biogás, porém emitem menor quantidade de poluentes NOx na atmosfera.

Com as unidades já instaladas no Brasil e no mundo observa-se uma quantidade maior de estações de tratamento de esgotos que utilizam grupos moto-geradores do que microturbinas e que em todas as estações os gases de exaustão são utilizados para manter a temperatura dos biodigestores ou gerar aquecimento para a própria instalação (cogeração de energia).

Com a literatura e os projetos reais pode se observar que este tema é recente e ainda com poucas informações sobre as tecnologias que podem ser utilizadas. Valores reais de projeto e suas tecnologias são ainda de difícil obtenção e na literatura só existem estudos realizados de viabilidade técnica e econômica, mas com poucos valores reais de mercado.

Por ser um assunto recente as tecnologias apresentadas (microturbinas e motores a biogás) ainda são caras, pois precisam ser adaptadas e existem para importação, porém com o desenvolvimento deste tipo de aproveitamento energético há uma tendência de desenvolvimento também das tecnologias que as tornem cada vez mais viáveis.

O assunto é de grande importância não somente do ponto de vista técnico, mas também do ponto de visto ambiental (uma vez que o biogás contém muito metano e este é extremamente poluidor) e do ponto de vista social (pois com a geração de energia elétrica nas estações de tratamento ocorre a viabilidade de implantação de mais estações, o que gera mais empregos e melhora a qualidade de vida da sociedade evitando doenças provenientes da falta de tratamento do esgoto).

REFERÊNCIAS

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico Técnico Institucional da Recuperação e Uso Energético do Biogás Gerado pela Digestão Anaeróbica de Resíduos**. Dissertação de Mestrado, PIPGE/USP, São Paulo, 2000.

ALVES, J. W.; BORGES, P. R.; MANSO, S. M. V.; DE LUCAS, J.; ZULAUF, M. R. **Nota técnica VII: Geração de Energia a partir do Biogás Gerado por Resíduos Urbanos e Rurais.** São Paulo. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2001.

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, p. 755-781, 2008.

BANFIELD, P.; LITTLEJOHN, J. **Waste to energy: Seafield case study**. Veolia Water, 1012.

BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento, Brasil, 1998.

BRUNO, J. C.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; CORONAS, A. Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant. **Applied Energy**, n. 86, 837–847, 2008.

BRUNNER, C.R. Waste-to-energy combustion (Chapter 11, Part A). IN: KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. New York: McGraw-Hill, 1994, p. 11.67.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - CENBIO. **Projeto instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto (ENERG-BIOG)**. Relatório Técnico final. São Paulo: ENERG, 2004. 222 p.

CHAMBERS, D.; VILKKO, A.; CHAUVIN, D., HARNUM, J.; TECH, D. I**ntegration of a digester gas co-generation facility at the Woodward Avenue WWTP, Hamilton, Ontario.** 2012.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S.; ABREU, F. C. de. **Biogas from Sewage Treatment used to Electric Energy Generation, by a 30 kW (ISO) Microturbine.** São Paulo. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2006.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; PECORA, V. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: estudo de caso em São Paulo.** São Paulo. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2009.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C. de. **The Production of Sewage Biogas and its Use for Energy Generation**. São Paulo. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2006.

COLLARES PEREIRA, M. **Energias renováveis, a opção inadiável**. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Energia Solar - SPES, 1998. 256 p.

COSTA, D.F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

EBMUD. East Bay Municipal Utility District, USA. 2000.

FRANÇA JUNIOR, A. T. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto.** 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

FUNASA. Fundação Nacional de Saúde, Brasil, 2011.

GODOY JÚNIOR, E. **Desenvolvimento e avaliação de uma miniestação ecoeficiente de tratamento de esgoto e reuso de águas, com sistema registrador queimador, para baixas vazões de biogás e cogeração de energia.** 2010. 158 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

HOME, J. **Innovative Energy Conservation Measures at Wastewater Treatment Facilities.** US EPA Office of Wastewater Management, 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil, 2000.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. São Paulo: Ed. ABES, 2009.

LAMAS, W.Q. **Análise termoeconômica aplicada a uma mini-estação de tratamento de esgoto com auto-suficiência energética.** 2007. 135 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

LOPES, A. O.; PORTUGAL, N. S.; PORTUGAL JUNIOR, P. S.; GUEDES, L. C. V. **Produção de metano em estações de tratamento de esgotos e co-geração de energia elétrica: um estudo de caso na ETE em Passos – MG**. Belo Horizonte. ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2011.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário – Coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SANEPAR – COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ – Paraná, 2010.

TASSOU, S. A. Combined heat and power generation at a sewage treatment plant - a feasibility study. **Heat Recovery Systems & CHP** Vol. 9, No. 2, pp. 169--174, 1988.

U. S. DOE CLEAN ENERGY APPLICATION CENTER – Project Profile: Allentown Wastewater Treatment Plant, 2011.

VAN HAANDEL, A. C. Influence of the digested cod concentration on the alkalinity requirement in anaerobic digesters, **Water Science Tech.**, n.30, 23-24, 1994.

VAN HAANDEL, A. C., LETTINGER, G. **Tratamento Anaeróbico de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente**, Epgraf, Campina Grande, 240 p, 1994.

WILDI, P. Design parameters for sludge treatment: interpretation of operation data from seven activated sludge plants for municipal sewage. **Water Research**, v. 6, p. 95-497, 1972.

http://www.epa.gov/region9/waterinfrastructure/features/chiquita.html - Acesso: 18/12/2013

http://www.copasa.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=31 - Acesso: 18/12/2013

http://www.sandiego.gov/mwwd/facilities/ptloma/index.shtml- Acesso: 18/12/2013

http://www.portlandoregon.gov/bes/article/344953- Acesso: 18/12/2013

http://www.clarke-energy.com/2011/chile-santiago-wastewater-treatment-biogas-plan/- Acesso: 18/12/2013

http://www.agbar.es/en/depuracion.html- Acesso: 18/12/2013

http://www.eydap.gr/index.asp?a_id=358- Acesso: 18/12/2013

http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/gas-turbines/SGT-400/Greek_wastewater_plant.pdf- Acesso: 18/12/2013

http://www.hamilton.ca/CityDepartments/PublicWorks/WaterAndWasteWaterDev/Treatment+Plant.htm- Acesso: 18/12/2013

http://www.sustainablebusinessoregon.com/articles/2010/12/gresham-plans-unique-hydro-project.html?page=all- Acesso: 18/12/2013

http://www.gizmag.com/human-waste-to-gas-project-goes-live/16572/?utm_source=PESWiki.com - Acesso: 18/12/2013

http://www.gizmag.com/wastewater-treatment-microbial-fuel-cell/23700/ - Acesso: 18/12/2013

http://www.stateofgreen.com/en/Profiles/Ramboll/Products/Sludge-to-Energy-in-Copenhagen-%28Lynettef%C3%A6llesskabe- Acesso: 18/12/2013