



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Luiz Leal Netto Machado

ASPECTOS TÉCNICOS RELACIONADOS À GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO LODO DE ESGOTO

Rio de Janeiro
2011



UFRJ

Luiz Leal Netto Machado

ASPECTOS TÉCNICOS RELACIONADOS À GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO LODO DE ESGOTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Eduardo Pacheco Jordão, Dr.Eng.

Orientador: Prof. Isaac Volschan Junior, D.Sc.

Rio de Janeiro
2011

Machado, Luiz Leal Netto

Aspectos técnicos relacionados à geração de energia elétrica a partir do lodo de esgoto/ Luiz Leal Netto Machado. – 2011.

107f.: il.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2011.

Orientadores: Eduardo Pacheco Jordão e Isaac Volschan Junior

1. Geração de energia elétrica. 2. Lodo de esgoto. 3. Biogás. I. Jordão, Eduardo Pacheco *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Título.



UFRJ

ASPECTOS TÉCNICOS RELACIONADOS À GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO LODO DE ESGOTO

Luiz Leal Netto Machado

Orientador: Prof. Eduardo Pacheco Jordão, Dr.Eng.

Orientador: Prof. Isaac Volschan Junior, D.Sc.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Presidente: Prof. Eduardo Pacheco Jordão, Dr.Eng.

Prof.^a Iene Christie Figueiredo, D.Sc.

Prof. Jorge Henrique Alves Prodanoff, D.Sc.

Prof. Adacto Benedicto Ottoni, D.Sc.

Rio de Janeiro
2011



Para Ângelo e Joana, meus netos, que
transmitem a alegria que torna mais
suaves os obstáculos da vida.



AGRADECIMENTOS

Além de agradecer a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização do Curso de Mestrado, agradeço, especialmente:

à Coordenação do PEA (Programa de Engenharia Ambiental) da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), gerida com a incansável dedicação da Professora Doutora Cláudia do Rosário Vaz Morgado, e à sua secretária, Sra. Valéria Vieira, pela atenção que sempre me foi dispensada desde o meu ingresso no Curso de Mestrado até a conclusão do mesmo;

aos brilhantes professores que tive ao longo do curso;

ao Professor Paulo Renato Diniz Junqueira Barbosa, chefe do DRHIMA (Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica da UFRJ), por seu incentivo, o que muito me ajudou a vencer as diversas etapas do curso;

aos Doutores Eduardo Pacheco Jordão e Isaac Volschan Junior, ilustres professores da Escola Politécnica da UFRJ, amigos que tanto prezo e que, gentilmente, me deram a oportunidade e a honra de tê-los como orientadores;

ao apoio que tive da Biblioteca do Centro de Tecnologia da UFRJ, na pessoa da Sra. Zoraide Dantas Ribeiro Freitas, uma de suas atenciosas e competentes funcionárias;

ao Engenheiro Paulo Afonso de Almeida, chefe do Departamento de Tratamento da CEDAE que opera a ETE Alegria, por ter fornecido, com extrema boa vontade, importantes subsídios para a elaboração deste trabalho;

a todos os colegas da Turma 1 deste Mestrado, por terem me proporcionado o prazer de poder incluí-los na minha relação de amigos;

à minha mulher, Ediléa Garcia Netto Machado, e aos meus filhos, Sandra Garcia Netto Machado Francese e Flávio Garcia Netto Machado, pelo estímulo sem o qual não teria sido possível a realização do curso.

RESUMO

MACHADO, Luiz Leal Netto. Aspectos técnicos relacionados à geração de energia elétrica a partir do lodo de esgoto. Rio de Janeiro, 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Na presente dissertação, são abordados aspectos técnicos referentes à geração de energia elétrica com a utilização do biogás proveniente do lodo resultante do tratamento de esgotos sanitários. Alternativas energéticas, por meio de fontes renováveis de energia, têm sido objeto de pesquisas no mundo inteiro, visando a diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, além de encontrar soluções ambientalmente sustentáveis para colaborar com a matriz energética dos países e reduzir os impactos globais provocados pela queima dos mesmos. Este trabalho aponta a possibilidade de recuperação e uso energético do biogás gerado pelo tratamento anaeróbio de esgoto, servindo também como incentivo para a ampliação deste serviço no Brasil, integrando o uso sustentável dos recursos naturais renováveis com o uso racional e eficiente de energia.

Palavras-chave: biogás, biomassa, geração de energia elétrica, lodo de esgoto.

ABSTRACT

MACHADO, Luiz Leal Netto. Aspectos técnicos relacionados à geração de energia elétrica a partir do lodo de esgoto. Rio de Janeiro, 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

The present dissertation approaches technical aspects regarding the generation of electric energy with biogas from sludge proceeding from treatment of sanitary sewage. Energy alternatives, by means of renewable sources of energy, have been the object of researches all over the world, in order to decrease the dependence on fossil fuels, besides finding environmentally sustainable solutions to collaborate with the energy matrix of the countries and to reduce the global impacts caused by the burning of them. This work shows the possibility of recovery and energetic use of the biogas produced by wastewater anaerobic treatment, serving also as an incentive to increase this kind of service in Brazil, integrating the sustainable use of the renewable natural resources with the rational and efficient use of energy.

Keywords: biogas, biomass, electric energy generation, sewage sludge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Opções para o aproveitamento e/ou geração de energia a partir do lodo 25%TS e classe B	44
Figura 2 – Aproveitamento do biogás somente em benefício da etapa de digestão anaeróbia	45
Figura 3 – Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia e para a geração de energia elétrica.....	45
Figura 4 – Aproveitamento do biogás somente para a geração de energia elétrica.....	46
Figura 5 – Opções para o aproveitamento e/ou geração de energia combinada ao emprego da secagem térmica	47
Figura 6 – Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia e como combustível para a secagem térmica, complementar ao gás natural.....	47
Figura 7 – Aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica e como combustível para a secagem.....	48
Figura 8 – Aproveitamento do biogás exclusivamente como combustível para a secagem térmica, complementar ao gás natural	48
Figura 9 – Aproveitamento do biogás somente como combustível exclusivo para a secagem térmica	49
Figura 10 – Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia e como combustível exclusivo para a secagem térmica	49
Figura 11 – Opções para o aproveitamento e/ou geração de energia combinada ao emprego da incineração	51
Figura 12 – Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia e como combustível para a incineração, complementar ao gás natural.....	51
Figura 13 – Aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica e como combustível para a incineração, complementar ao gás natural	52
Figura 14 – Aproveitamento do biogás somente como combustível para a incineração, complementar ao gás natural	52
Figura 15 – Opções para o aproveitamento e/ou geração de energia combinada ao emprego da secagem térmica e da incineração.....	53
Figura 16 – Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia e como combustível para a secagem térmica e a incineração, complementar ao gás natural	53

Figura 17 – Aproveitamento do biogás para a geração de energia e como combustível para a secagem térmica e a incineração, complementar ao gás natural	54
Figura 18 – Aproveitamento do biogás somente como combustível para a secagem térmica e a incineração, complementar ao gás natural.....	54
Figura 19 – Vista aérea da ETE Barueri.....	59
Figura 20 – Vista aérea da ETE Alegria.....	64
Figura 21 – Vista aérea da ETE Arrudas.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIDIS	Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APU	Airborne Power Unit
BEN	Balanco Energético Nacional
CEDAE	Companhia Estadual de Águas e Esgotos
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ)
cv	cavalo-vapor
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DESA	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG
EPA	Environmental Protection Agency
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
EUA	Estados Unidos da América do Norte
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GNR	Gás Natural Renovável
GWh	Gigawatt-hora
hab	habitante
HP	Horsepower
http	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICLEI	International Council for Local Environmental Initiatives
IEE	Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP
kJ	quilojoule
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MME	Ministério de Minas e Energia
MWh	Megawatt-hora
NBR	Norma Brasileira Registrada
PCT	Pequena Central Termoelétrica
PDBG	Programa de Despoluição da Baía da Guanabara
PIPGE	Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da USP
ppm	parte(s) por milhão
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
PUREFA	Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas
PVC	Cloreto de polivinila
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SSV	Sólidos em suspensão voláteis
ST	Sólidos totais
TS	Teor de sólidos
TWh	Terawatt-hora
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

USP	Universidade de São Paulo
WEF	Water Environment Federation
WWW	World Wide Web

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
3 METODOLOGIA	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 CONCEITUAÇÃO BÁSICA	19
4.2 CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO.....	21
4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O BIOGÁS	23
4.3.1 HISTÓRICO.....	23
4.3.2 FORMAÇÃO	24
4.3.3 CARACTERÍSTICAS.....	25
4.3.4 PURIFICAÇÃO	26
4.3.5 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO	28
4.4 UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA	28
4.5 ASPECTOS TÉCNICOS DA CONVERSÃO DO BIOGÁS.....	31
4.5.1 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA	31
4.5.1.1 TURBINAS A GÁS	32
4.5.1.2 MICROTURBINAS A GÁS	33
4.5.1.3 TURBINAS A VAPOR.....	34
4.5.1.4 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	35
4.5.2 COGERAÇÃO	36
4.5.2.1 CALDEIRAS E EQUIPAMENTOS DE ENERGIA TÉRMICA	36
4.5.2.2 TIPOS DE COGERAÇÃO	37
4.5.3 CICLOS DE COGERAÇÃO.....	37
4.5.3.1 CICLO DE COGERAÇÃO COM TURBINAS A VAPOR	37
4.5.3.2 CICLO DE COGERAÇÃO COM TURBINAS A GÁS.....	38
4.5.3.3 GERAÇÃO ELÉTRICA COM CICLO COMBINADO.....	38
4.5.3.4 COGERAÇÃO COM CICLO COMBINADO.....	39
4.5.3.5 CICLO DE COGERAÇÃO COM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	39
4.5.4 ANÁLISE TÉCNICA COMPARATIVA ENTRE AS TECNOLOGIAS	40
4.6 GERAÇÃO DE CALOR.....	40
4.7 SECAGEM TÉRMICA	41
4.8 INCINERAÇÃO.....	43
5 MODALIDADES PARA O APROVEITAMENTO DO BIOGÁS	44
6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	55
7 OS CASOS BRASILEIROS	57
7.1 ETE BARUERI	57
7.1.1 APROVEITAMENTO DO BIOGÁS.....	57
7.1.2 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PCT COM MICRO- TURBINA A BIOGÁS.....	58
7.1.3 PCT COM MOTORES CICLO OTTO	58

7.2 ETE ALEGRIA	60
7.2.1 ABRANGÊNCIA DO PROJETO	60
7.2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	60
7.2.3 JUSTIFICATIVA DO PROJETO CONCEITUAL DA USINA DE BIOGÁS	61
7.2.4 APROVEITAMENTO DO BIOGÁS.....	62
7.2.5 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS	62
7.2.6 DESCRIÇÃO DAS ROTAS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	63
7.3 ETE ARRUDAS.....	64
7.3.1 DESCRIÇÃO	64
7.3.2 APROVEITAMENTO DO BIOGÁS.....	65
7.3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS	65
8 ESTUDO HIPOTÉTICO	
POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PROVENIENTE DO LODO DE UMA ETE POR LODOS ATIVADOS PARA 100.000 HABITANTES	67
9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	71
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE – FABRICANTES DE EQUIPAMENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS	79
ANEXO A – RESOLUÇÃO CONAMA Nº 375/2006.....	81
ANEXO B – RESOLUÇÃO CONAMA Nº 380/2006.....	105

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho refere-se à geração de energia elétrica com a utilização do biogás originário do lodo resultante do tratamento de esgotos sanitários, definindo-se como esgoto sanitário o despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração (proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações) e a contribuição pluvial parasitária (parcela do deflúvio superficial, inevitavelmente absorvida pela rede coletora de esgoto sanitário). (ABNT, 1986)

O lançamento dos esgotos “in natura” no meio ambiente apresenta aspectos negativos entre os quais podem ser destacados: a possibilidade de transmissão de doenças, o assoreamento de corpos hídricos e a eutroficação desses corpos.

A essência dos processos biológicos de tratamento de esgotos reside na capacidade de os microrganismos envolvidos utilizarem os compostos orgânicos biodegradáveis, transformando-os em subprodutos que podem ser removidos do sistema de tratamento. Os subprodutos formados podem se apresentar na forma sólida (lodo biológico), líquida (água) ou gasosa (gás carbônico, metano etc.). Qualquer que seja o processo adotado, aeróbio ou anaeróbio, a capacidade de utilização dos compostos orgânicos depende da atividade microbiana da biomassa presente. (Chernicharo, 2007) As diferenças entre os processos são muitas, mas, para os microrganismos que deles participam, a importância está na quantidade de energia final liberada. Enquanto o processo aeróbio produz cerca de 673 quilocalorias, o anaeróbio tem uma produção de 36 quilocalorias. (Britto, 2004)

As oxidações nos processos anaeróbios se dão à custa do oxigênio contido nas moléculas das substâncias em reação, e, assim sendo, trata-se de uma oxidação parcial, que fornece compostos ainda oxidáveis. É devido a este fato que a energia produzida pelo processo anaeróbio é bem menor, tendo como consequência um rendimento muito inferior. Como o processo anaeróbio tem um rendimento menor, os tipos de tratamento que o utilizam demandam mais tempo. Até recentemente, a utilização dos processos anaeróbios, para o tratamento de efluentes líquidos, era considerado antieconômico e problemático. Sem dúvida, a reduzida taxa de crescimento da biomassa anaeróbia faz com que o controle do processo seja delicado, uma vez que a recuperação do sistema é bastante lenta quando a biomassa anaeróbia é exposta a condições ambientais adversas.

O uso da biomassa como fonte renovável e sustentável de energia, quer como resíduos sólidos urbanos, efluentes industriais ou comerciais e resíduos rurais, permite diversificar a matriz energética nacional, além de reduzir a emissão de gases do efeito estufa. A geração de resíduos sólidos e efluentes domésticos está diretamente relacionada com a população urbana, seu padrão de vida e hábitos de consumo. A coleta, tratamento e disposição adequada destes resíduos se refletem na qualidade de vida da população e das águas dos rios e subterrâneas, bem como na atividade pesqueira e nos vetores patogênicos.

Com a crise do petróleo nos anos 1970 foi dada ênfase no Brasil à tecnologia da digestão anaeróbia. Na Região Nordeste, foram implantados vários programas de difusão dos biodigestores e a expectativa era grande, porém os benefícios obtidos a partir do biogás e do biofertilizante não foram suficientes para dar continuidade aos programas e os resultados não foram muito satisfatórios. (Boletim Enfoque, apud Pecora, 1999)

O grande volume de resíduos, a partir dos quais é possível obter biogás, oriundos das explorações agrícolas e pecuárias, assim como aqueles produzidos por matadouros, destilarias, fábricas de laticínios, esgotos domésticos e estações de tratamento de lixo urbanos, apresenta uma carga poluente elevada que impõe a criação de soluções que permitam diminuir os danos provocados pela poluição, gastando o mínimo de energia possível em todo o processo. (CENBIO, apud Pecora, 2000a)

O composto orgânico resultante do aproveitamento energético do lodo dos esgotos sanitários pode e deve ser utilizado para: recuperar o húmus do solo; baratear o reflorestamento e a agricultura; fixar vegetação no solo. Ao recuperar o húmus e a vegetação, possibilitará maior retenção de água de chuva e infiltração de água no solo, recuperando os mananciais hídricos. Ao fixar vegetação, contribui para melhorar o clima (efeito da evapotranspiração) e combater o efeito estufa, além de permitir a recuperação da biodiversidade do ecossistema local e de evitar o lançamento do lodo dos esgotos nos aterros sanitários, o que aumenta os custos de operação das estações de tratamento de chorume e os riscos de poluição ambiental. Numa política pública sustentável, tudo isso será consequência do aproveitamento energético do lodo dos esgotos sanitários.

As políticas públicas que privilegiam o uso de energia através dos combustíveis fósseis, da construção de grandes barragens para o aproveitamento hidrelétrico e da utilização de usinas nucleares, que geram grandes passivos ambientais, devem ser usadas como última alternativa, privilegiando fontes limpas de energia, como a solar, a eólica, as pequenas centrais hidrelétricas e a energia de biomassa, incluindo a energia gerada a partir do biogás do lodo dos esgotos. As fontes mais impactantes seriam, então, utilizadas apenas para complementar a carência energética das fontes mais limpas, o que não acontece atualmente. Observa-se que está havendo um exaurimento das fontes impactantes (como os combustíveis fósseis), a ampliação de usinas nucleares e a construção de grandes barragens, em detrimento de fontes mais limpas de energia, como o aproveitamento do biogás dos esgotos e do lixo orgânico. Esse enfoque deve ser mudado, visando à preservação das fontes de energia, bem como dos ecossistemas naturais (pela prevenção da poluição ambiental) e da saúde e sobrevivência do ser humano.

Um dos mais conhecidos sistemas de obtenção do biogás é o biodigestor para aplicação rural, existindo grande número de unidades instaladas, principalmente nos países originários dos modelos mais difundidos: a Índia (com aproximadamente 300 mil) e a China (com mais de 8 milhões). Recentemente, vários outros países do continente europeu têm realizado programas de disseminação e uso de biodigestores. (Boletim Enfoque, 1999)

Um sistema de geração de energia, a partir do biogás, possui 3 componentes básicos: a captação do gás, o processamento e a conversão do gás, que promove sua limpeza (remoção de partículas em suspensão e outros contaminantes) e o converte em eletricidade, e o equipamento de interconexão que transfere a eletricidade, a partir da geração, ao usuário final.

2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo apresentar elementos relacionados à tecnologia aplicada à geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do lodo resultante do tratamento de esgotos sanitários, procurando avaliar a viabilidade técnica da implantação de um sistema que tenha esse tipo de geração de energia como meta.

Objetivou-se, de forma mais específica, fornecer subsídios aos profissionais que se interessam pelo assunto, atualizando o conhecimento sobre os aspectos tecnológicos envolvidos, tendo em vista que a literatura técnica disponível trata do mesmo de forma não muito abrangente. Para tanto, foram utilizados dados e informações compilados de trabalhos realizados, no Brasil e no exterior, no âmbito do tema ora abordado.

3 METODOLOGIA

O estado da arte das metodologias e modelos, que foram propostos por diversos autores no campo da Análise Tecnológica na área de saneamento, e, de forma mais restrita, em tratamento de efluentes sanitários, pode ser encontrado nas revisões bibliográficas que vêm sendo atualizadas em função de pesquisas realizadas no Brasil e no exterior. Conclui-se, da literatura, que ocorreu um avanço das técnicas, passando dos métodos econômicos para os métodos multiobjetivos.

Fundamentalmente, podem ser distinguidas duas principais abordagens metodológicas: a Econômica e a Tecnologia Apropriada. As metodologias com base em otimização empregam a abordagem Econômica, com o custo sendo normalmente o fator decisório. Nos modelos que usam a abordagem de Tecnologia Apropriada, é feita uma análise global após uma avaliação tecnológica. (Chernicharo et al, 2001)

O procedimento metodológico compreende uma análise do tema abordado, com a utilização de elementos obtidos através de pesquisa bibliográfica em diversas publicações (livros e artigos científicos, bem como revistas e textos especializados).

Alguns dos subsídios que serviram de base para o desenvolvimento da presente dissertação, foram obtidos em visita de campo feita à ETE Alegria.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CONCEITUAÇÃO BÁSICA

Tratar esgotos sanitários significa utilizar um ou mais processos que visam a reduzir seu teor de agentes contaminantes, de tal modo que os subprodutos finais possam ser reutilizados ou devolvidos ao meio ambiente sem que as características desse meio sejam alteradas negativamente, mantendo o equilíbrio natural do ambiente no entorno. O objetivo principal do tratamento do esgoto é corrigir as 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.

Resumidamente, a primeira fase do tratamento convencional de esgoto, a nível chamado preliminar, consiste na retenção de sólidos grosseiros (através de gradeamento) e na desarenação. A próxima etapa ocorre no(s) tanque(s) decantador(es) primário(s) onde se dá a sedimentação de partículas sólidas no fundo do(s) tanque(s). O lodo acumulado no fundo do decantador é retirado e encaminhado para adensador(es) por gravidade e digestor(es), em geral, anaeróbio(s). No digestor, os microrganismos anaeróbios consomem a matéria orgânica constituinte do lodo; em seguida, o lodo é encaminhado à secagem e, após esse processo, ao seu destino (aterro sanitário, por exemplo). É nos digestores, durante o processo de oxidação da matéria orgânica, que ocorre a liberação de biogás; é possível o aproveitamento de parte dele como combustível, muitas vezes para abastecer equipamentos da própria estação de tratamento, como é o caso dos secadores térmicos. A principal vantagem do processo anaeróbio é que a degradação do material orgânico é acompanhada da produção de energia na forma de biogás, enquanto que a produção de lodo é menor quando comparada com processos aeróbios. (Van Haandel. apud Costa, 1994)

O termo “**lodo**” tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos. Nos processos biológicos de tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana, a qual compõe o lodo secundário, constituído principalmente de sólidos biológicos, e, por esta razão, também denominado de **biossólido**. Para que este termo possa ser adotado é necessário, ainda, que suas características químicas e biológicas sejam compatíveis com uma utilização produtiva. O termo “biossólido” é uma forma de ressaltar os seus aspectos benéficos, valorizando a

utilização produtiva, em comparação com a mera disposição final improdutivo, por meio de aterros, disposição superficial no solo ou incineração. (Von Sperling, 2005)

O destino final do lodo gerado nas estações de tratamento tem-se apresentado como um dos principais problemas na cadeia “coleta – tratamento – disposição final”. Na verdade, o destino final envolve estudos e decisões relativos ao condicionamento e estabilização do lodo gerado, grau de desidratação, formas de transporte, eventual reúso do lodo, eventuais impactos e riscos ambientais, e aspectos econômicos desta destinação final. A questão, portanto, não é simples e deve ser analisada sob uma ótica abrangente. (Jordão, 2011)

Em linhas gerais, o aproveitamento energético do biogás melhora o desempenho global do processo de tratamento de esgoto, uma vez que um subproduto do processo (o biogás) é transformado em matéria-prima (energia).

Embora os combustíveis fósseis exerçam um papel fundamental como fonte de energia nas atividades humanas, as energias renováveis, entre as quais se encontra a biomassa, têm sido cada vez mais pesquisadas no Brasil e no exterior, em consequência da crescente conscientização da sociedade quanto aos seus aspectos positivos. Entre as energias renováveis, a biomassa é uma das opções para se diversificar a matriz energética, permitindo um planejamento de sua utilização conjunta com fontes convencionais já existentes ou, dependendo das condições locais e do projeto a ser executado, apresentar-se como a principal fonte de energia. (Costa, 2006)

A produção de biogás é, usualmente, estimada a partir da porcentagem de redução de sólidos voláteis e pode variar bastante, dependendo da quantidade desses sólidos contida no lodo e da atividade biológica no digestor. (Metcalf, 2003)

O gás gerado na digestão anaeróbia é obtido na produção aproximada de 15 a 20 l/hab.d, para lodo primário, e de 25 a 30 l/hab.d para lodo misto (primário + secundário). O gás produzido no digestor (recebendo lodo misto) é da ordem de 0,8 a 1,1 m³ por quilograma de sólidos voláteis destruídos, de acordo com as condições em que se processa a digestão, principalmente a temperatura. (Jordão, 2011)

4.2 CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO

São apresentados, a seguir, dados relevantes sobre a produção e o consumo de energia no país, evidenciando a importância da ampliação do uso de energias renováveis na composição da matriz energética nacional.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) publicado em 2009, referente ao ano de 2008, a composição da matriz energética brasileira é a seguinte:

petróleo e derivados.....	36,7%
produtos da cana-de-açúcar	16,4%
biomassa (inclusive lenha, carvão vegetal e outras fontes renováveis).....	15,1%
energia hidráulica e eletricidade	13,8%
gás natural.....	10,3%
carvão mineral e derivados	6,2%
urânio e derivados.....	1,5%

Entre as fontes não renováveis de energia, fica evidente que o consumo de petróleo e seus derivados ainda é muito elevado no país (36,7%), seguido de gás natural (10,3%) e carvão mineral (6,2%). Essas fontes totalizam 53,2% da matriz nacional. Observa-se, consultando o BEN, que a participação de energias renováveis nessa matriz é bastante significativa, totalizando 45,3%, e que a participação dessas energias renováveis não aumentou nos últimos anos.

A utilização de energias renováveis no país baseia-se, principalmente, em hidrelétricas (13,8%), produtos da cana-de-açúcar (16,4%), lenha e carvão vegetal (11,6%). Apenas 3,5% da matriz energética brasileira correspondem a outras fontes de energia renovável.

Pode-se constatar que, nos últimos anos, ocorreu substancial aumento do uso de petróleo e derivados, de gás natural e de produtos de cana-de-açúcar para a produção de energia no país. Contudo, a participação do petróleo e derivados continua sendo muito maior do que a das demais fontes energéticas. Isto significa que a atual matriz energética brasileira afeta negativamente o cenário já crítico do aquecimento global, tendo em vista que a queima

de petróleo e seus derivados emite grandes quantidades de gás carbônico para a atmosfera, além de liberar óxidos de enxofre e de nitrogênio, causadores da chuva ácida.

Quanto à evolução do consumo energético por diferentes setores, fica evidente o acentuado aumento do consumo de energia pelos setores industrial e de transporte. No ano de 2008, esses dois setores foram responsáveis por 68,7% do consumo total de energia no país. É a seguinte a participação percentual dos diferentes setores no consumo de energia:

industrial	39,7%	
transportes.....	29,1%	
energético.....	11,2%	
residencial.....	10,8%	
agropecuário	4,6%	
comercial	2,9%	
público	1,7%	(ICLEI, 2009)

Em 2008, a oferta de energia elétrica foi de 496,4 TWh (terawatt-hora), enquanto que a demanda foi de 428,7 TWh.¹

Tanto a oferta quanto a demanda de energia elétrica têm crescido nos últimos anos, porém a demanda está bem próxima da oferta. Em 2008, por exemplo, a diferença entre a oferta e a demanda foi de apenas 13,6%. Isto significa que o Brasil não tem grande excedente de energia elétrica.

Caso o país consiga atingir, nos próximos anos, um nível de crescimento econômico acima da média recente, inevitavelmente haverá falta de energia elétrica, já que a instalação de novas hidrelétricas demanda vários anos para sua conclusão.

Outro fator importante a ser considerado é que as hidrelétricas, que são importantíssimas para a geração de energia elétrica no país, também serão afetadas pelas mudanças globais do clima, tendo em vista que os ciclos hidrológicos no planeta já

¹ Obs: 1 TWh = 10³ GWh = 10⁶ MWh.

começaram a ser alterados. Isso já foi constatado em 2001, quando ocorreu o chamado “apagão”, em função do menor índice de chuvas naquele ano.

Assim, para que o Brasil não sofra falta de energia elétrica, nem fique mais dependente do petróleo e seus derivados, é importante diversificar sua matriz energética e ampliar o uso de outras fontes de energia renovável abundante no país, tais como:

- energia solar
- energia eólica
- energia das marés
- biomassa, como resíduos de madeira, cascas de arroz, entre outras
- biogás, gerado, por exemplo, em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto.

(ICLEI, 2009)

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O BIOGÁS

4.3.1 HISTÓRICO

Atribui-se o nome “biogás” à mistura gasosa, combustível, resultante da fermentação anaeróbia 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, esta 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, urbana ou industrial. (Costa, 2006)

Tudo leva a crer que o metano (gás dos pântanos, como era chamado) foi descoberto por Shirley em 1667. (Classen, 1999) No século XIX, Ulysse Gayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbia de uma mistura de esterco e água, a 35°C , conseguindo obter 100 litros de metano por metro cúbico de mistura. Em 1884, Pasteur, ao apresentar à Academia das Ciências da França os trabalhos do seu aluno, considerou que esta fermentação poderia constituir-se numa fonte de aquecimento e iluminação.

Na Índia, a idéia de aproveitar o gás metano, produzido por digestão anaeróbia, já era conhecida. No ano de 1859 foi realizada numa colônia de hansenianos na cidade de Bombaim (atual Mumbai) a primeira experiência de utilização direta de biogás. Pouco mais de 30 anos depois, em 1895, foi posta em prática a primeira experiência européia, com a utilização do biogás para a iluminação de algumas ruas da cidade de Exter, na Inglaterra.

Apesar dessas e outras experiências, o biogás não conseguiu substituir os combustíveis tradicionais e sua exploração foi bastante reduzida, limitando-se a alguns casos esporádicos. Somente nos anos 1940, devido a carências energéticas significativas provocadas pela II Guerra Mundial, o biogás voltou a ser utilizado nas cozinhas, para o aquecimento de casas e para a alimentação de motores de combustão interna.

Nas décadas de 1950 e 1960, a relativa abundância das fontes de energia tradicionais desencorajou a recuperação do biogás na maioria dos países desenvolvidos, e, apenas em países com poucos recursos de capital e energia, como a Índia e a China, o biogás desempenhou um papel de certa importância, sobretudo em pequenas comunidades rurais.

A partir da crise energética dos anos 1970, o gás metano dos digestores anaeróbios voltou a despertar o interesse geral. Até pouco tempo atrás, o biogás era simplesmente encarado como um subproduto, obtido a partir da decomposição anaeróbia de lixo urbano, de resíduos animais e de lodo proveniente de estações de tratamento de efluentes domésticos. No entanto, a alta acentuada do preço dos combustíveis convencionais tem encorajado as investigações na produção de energia a partir de novas fontes alternativas e economicamente atrativas, de modo a criar novas formas de produção energética que possibilitem a redução do uso dos recursos naturais esgotáveis.

A produção de energia elétrica a partir de biogás é uma prática corrente em vários setores da economia. No setor agrícola, por exemplo, as granjas de suínos utilizam o processo de digestão anaeróbia para tratar as águas residuais resultantes da limpeza de pocilgas e produzir biogás para, em seguida, convertê-lo em energia elétrica ou energia térmica. (Costa, 2006)

4.3.2 FORMAÇÃO

Como visto anteriormente, o biogás é uma mistura gasosa combustível, produzida através da digestão anaeróbia (processo fermentativo que tem como finalidade a remoção de

matéria orgânica, a formação de gases e a produção de biofertilizantes ricos em nutrientes). A produção de biogás também é possível a partir de diversos resíduos orgânicos, como esterco, lodo de esgoto, lixo doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas. Neste caso, quando a digestão anaeróbia é realizada em biodigestores especialmente planejados, a mistura gasosa produzida pode ser usada como combustível, que, 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 fertilizante. (Pecora, 2006)

A etapa final do processo de conversão anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono é efetuada pelos microrganismos metanogênicos. Existem dois mecanismos básicos de formação do metano: pela decomposição do ácido acético e pela redução do gás carbônico. O metano produzido no processo de digestão anaeróbia é rapidamente separado da fase líquida, devido à sua baixa solubilidade na água. (Chernicharo, 2007)

4.3.3 CARACTERÍSTICAS

A composição típica do biogás é, aproximadamente: 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, amônia, gás sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio. Dependendo da eficiência do processo, influenciado por fatores como pressão e temperatura durante a fermentação, o biogás pode conter entre 40% e 80% de metano. (Wereco-Brobby, 2000)

O estudo da viabilidade de emprego do biogás normalmente se inicia pela avaliação de equivalência energética entre o biogás e o combustível a ser substituído. Além do poder calorífico, é necessário que se considerem outras propriedades como a presença de contaminantes, a acidez e a pressão. Tais considerações contribuem para uma previsão adequada das adaptações necessárias ao emprego do biogás, quer seja como único recurso energético ou como combustível complementar.

As características do biogás dependem da pressão, da temperatura e da umidade, bem como da concentração de metano e de gases inertes e/ou ácidos. O biogás pode ser usado nas condições em que é gerado e, dependendo da aplicação, pode ser necessária a redução da

concentração de gás sulfídrico e de dióxido de carbono, e também a redução da umidade e/ou a elevação da pressão.

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. (Costa, 2006)

O poder calorífico de um gás é definido como sendo a quantidade de energia que é liberada pela queima de uma unidade de volume do gás.

A seguir, encontram-se relacionados alguns gases com os seus respectivos poderes caloríficos em kJ/m^3 (quilojoule por metro cúbico):

propano comercial	45.800
butano comercial	44.600
gás natural	37.300
metano	35.800
gás da digestão	22.400 (admitindo 65% de metano gerado no digestor)

Obs.: O poder calorífico do óleo combustível é de $3,9 \times 10^7 \text{ kJ/m}^3$.

Observa-se que, comparativamente aos gases comerciais, o biogás tem um poder calorífico muito menor, mas, mesmo assim, seu uso é vantajoso, podendo mesmo praticar-se a cogeração, isto é, a geração de energia elétrica e ainda de mais uma forma de energia, normalmente produção de vapor ou aquecimento dos digestores com o auxílio de trocadores de calor. (Jordão, 2011)

4.3.4 PURIFICAÇÃO

Os sistemas de limpeza de gases são desenvolvidos para corrigir as propriedades naturais do biogás para que o mesmo atenda às especificações técnicas dos equipamentos de conversão.

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono (CO_2), prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente; estas substâncias

entram no lugar do combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. Pode ocorrer combustão incompleta, perda de potência e corrosão precoce provocada pela presença do ácido sulfídrico (H_2S), diminuindo tanto o rendimento quanto a vida útil do motor térmico.

Existem diferentes alternativas de purificação aplicáveis ao biogás, devendo ser definida a mais adequada para a aplicação energética que se pretende. Por exemplo: para a aplicação no ramo automotivo, é necessária uma etapa de purificação onde o biogás passa por um filtro de óxido de ferro, responsável pela retirada dos traços de enxofre. Livre do H_2S , o biogás é conduzido a um compressor de baixa pressão, que tem por finalidade forçar a passagem do biogás através de uma torre de absorção de CO_2 . Nesta torre, água pressurizada é pulverizada em gotículas para facilitar a absorção do CO_2 . Este processo resulta na dissolução do CO_2 , formando ácido carbônico (H_2CO_3), que é enviado para a caixa de eliminação, que tem por finalidade separar o gás carbônico da água, onde o CO_2 é liberado para a atmosfera. Após este processo, a água é recalçada para a torre de absorção e o metano purificado é armazenado.

Devido ao modo como é gerado, o biogás pode conter alto teor de umidade. Qualquer resfriamento do gás durante o processo, causa frequentemente condensação da fase líquida quando o gás entra no equipamento de conversão, sendo crítica a situação ao se tratar de turbinas a gás. A remoção do condensado, seguida do aquecimento do gás, produz um gás seco cuja temperatura é superior ao seu ponto de orvalho. O mesmo efeito pode ser criado pelo uso de um dessecante. Comprimindo o gás seco e resfriando-o em seguida, mais condensado é produzido. Mais uma vez, o gás deve ser resfriado, separado e reaquecido, ou passado por um dessecante.

Foi observada, por fabricantes norte-americanos de microturbinas, a presença de uma impureza no biogás denominada siloxina, um composto de sílica proveniente de produtos de higiene pessoal e cosméticos. Sua presença, na ordem de ppb (partes por bilhão), acarreta, ao longo do tempo, problemas nos rotores de turbinas e motores pela formação de grãos de sílica (areia) no interior dos equipamentos, devido à elevada temperatura. Esta substância apresenta baixa solubilidade na água e se aglomera nos sólidos transferidos aos digestores das

estações de tratamento de esgoto. Para a remoção desta impureza, a técnica utilizada é a adsorção através de carvão ativado. (Costa, 2006)

4.3.5 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO

Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás, cuja energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica. Há de se mencionar, também, o uso da queima direta do biogás em caldeiras, para cogeração, e o surgimento de tecnologias recentes, como a da célula combustível. As turbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo “Ciclo-Otto” são as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de conversão energética. (Coelho et al, 2006)

A Suécia e o Japão são os países mais avançados com relação ao aproveitamento e à geração de energia e recuperação de materiais. Já há alguns anos, Holanda, Estados Unidos, Reino Unido, Alemanha, Nova Zelândia, China e Malásia, entre outros países, também possuem instalações com estas mesmas finalidades.

O conceito de aproveitamento e/ou geração de energia a partir do lodo, pode ser aplicado segundo as seguintes modalidades:

- aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia ou como combustível das etapas subsequentes de secagem térmica e/ou incineração;
- utilização direta do biogás para geração de energia elétrica por meio de motores de combustão interna, turbinas ou células combustíveis;
- alimentação de unidades subsequentes de recuperação de energia térmica (caldeira), conjuntamente aos gases quentes da incineração, e utilização do vapor gerado por motores de combustão interna ou turbinas;
- a partir da conversão do lodo em gás de síntese (gasogênio) ou óleo combustível.

(Volschan Jr., 2009)

4.4 UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA

Para garantir um sistema de recuperação do biogás, técnica e economicamente viável, deve haver disponibilidade de biogás, operação satisfatória do sistema e garantia de

compra do excedente de energia gerado. A relação entre os ganhos com a venda do excedente de energia e os gastos de implantação, operação e manutenção definem o produto final, isto é, o lucro que viabiliza o empreendimento.

Projetos de recuperação do biogás gerado em uma estação de tratamento de esgoto são diferentes daqueles correspondentes ao biogás gerado em aterros sanitários. No segundo caso, a quantidade de produção de biogás é maior, além de ser o mesmo mais rico em metano. (Pecora, 2006)

Os digestores anaeróbios são peças importantes na recuperação do biogás. Na maioria das vezes, uma instalação não é desenvolvida com o objetivo de gerar biogás, e sim, tratar os esgotos, preservando a qualidade do ar e dos corpos receptores.

De um modo geral, a digestão anaeróbia no tratamento de esgotos possui as seguintes vantagens (adaptado de Von Sperling, 2005):

- baixo custo de implantação
- elevada sustentabilidade do sistema; pouca dependência de fornecimento de energia, peças e equipamentos de reposição
- simplicidade operacional, de manutenção e controle
- baixos custos operacionais
- adequada eficiência na remoção de diversas categorias de poluentes (matéria orgânica biodegradável, sólidos em suspensão, nutrientes e patogênicos)
- pouco ou nenhum problema com a disposição do lodo gerado no sistema
- baixos requisitos de área
- possibilidade de aplicação em pequena escala (sistemas descentralizados) com pouca dependência da existência de grandes interceptores
- fluxograma simplificado de tratamento
- elevada vida útil
- ausência de problemas que causem transtorno à população vizinha
- possibilidade de recuperação de subprodutos úteis, como biofertilizante (visando a sua aplicação na fertilização de culturas agrícolas) e o biogás.

Por outro lado, há riscos de acidentes associados à recuperação, armazenamento e uso do biogás, tanto em estações de tratamento de esgotos como em aterros sanitários.

A análise de impacto ambiental de uma instalação de recuperação energética do biogás pode apresentar aspectos positivos e negativos, como exemplificado a seguir:

- Impacto positivo: quando o biogás é coletado e queimado em um sistema de obtenção de energia, os seus componentes que contribuem para o efeito estufa são destruídos, evitando o consequente prejuízo ambiental.
- Impacto negativo: risco de acidentes; uma criteriosa análise de riscos fornecerá mecanismos a serem adotados objetivando eliminá-los.

Para a inserção da prática de energias renováveis na matriz energética brasileira, enfrentam-se três tipos de barreiras: a econômica, a financeira e a política:

- Barreira econômica: dificuldade de concorrência com as fontes fósseis dentro de um mercado liberalizado.
- Barreira financeira: falta de regulamentação clara para diminuir os riscos e incentivar o investidor privado a financiar as fontes renováveis; a desestruturação do setor energético em vários países tem dificultado esta inserção. No Brasil, a falta de investimentos em saneamento básico representa uma barreira à implementação de projetos de aproveitamento energético do biogás.
- Barreira política: dificuldade de definir a extensão que o governo pode intervir no setor, caso isto seja necessário; sendo necessário, deve-se buscar apoio político formando coalisões com todos os segmentos engajados nos objetivos da proposta de intervenção. (Pecora, 2006)

Quase sempre, o uso de equipamentos para operar com biogás depende de uma ou mais adaptações. Em geral, uma adaptação de baixo custo não é satisfatória, pois o rendimento energético é baixo, os intervalos entre paradas para manutenção são menores e a confiabilidade do equipamento reduz-se drasticamente.

Para a instalação de um sistema de geração de energia elétrica em uma empresa, deve-se considerar, antes de tudo, a necessidade energética da empresa interessada. Uma

empresa que necessite calor em seu processo pode substituir parte do seu combustível principal pelo biogás. Este uso pode ser feito pela mistura de combustíveis ou pela introdução de um estágio alternativo, onde o biogás forneceria parte da energia permitindo a redução do consumo energético do estágio principal.

Para a implantação de um sistema de aproveitamento energético do biogás, deve-se levar em consideração que alguns equipamentos e produtos específicos não são nacionais, o que impacta nos custos de capital dos projetos, além do alto custo das tecnologias de geração de energia elétrica. A falta de leis que impulsionem o mercado (carente de políticas de incentivo tarifário e/ou subsídios), também é um fator que pesa contra a utilização desta fonte de energia.

4.5 ASPECTOS TÉCNICOS DA CONVERSÃO DO BIOGÁS

4.5.1 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA

Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás, entendendo-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada (relação da mistura entre ar e combustível). Essa energia mecânica ativa um alternador que a converte em energia elétrica. Também pode ser mencionada a queima direta do biogás em caldeiras para cogeração ou energia térmica e o surgimento de novas tecnologias, que ainda não são consideradas comerciais, como a da célula combustível; porém, as turbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo “ciclo Otto” são as tecnologias mais utilizadas para essa conversão energética. (Costa, 2006)

A geração de energia elétrica a partir do biogás pode ser considerada como alternativa por suas significativas vantagens estratégicas, econômicas e ambientais:

- Vantagens estratégicas: geração descentralizada, próxima aos pontos de carga, não necessitando de investimentos em linhas de transmissão.
- Vantagens econômicas: utilização de combustível disponível no local e de baixo custo (resíduo de processo); dinamização do setor de máquinas e equipamentos no país.

- Vantagens ambientais: utilização de energia renovável (biomassa), com menores emissões poluentes e com balanço de carbono negativo (contribuindo para a redução do efeito estufa).

Entretanto, apesar de todas essas vantagens, a geração de energia a partir de biogás ainda é muito reduzida no Brasil. Características peculiares dos setores envolvidos, bem como o pouco interesse de grande parte das concessionárias, aliado à complexidade de legislação do setor elétrico, até recentemente vigente no país, acabaram por desestimular este processo de geração.

Existem, para a geração de energia elétrica a partir do biogás, basicamente dois tipos de tecnologias disponíveis comercialmente: turbinas a gás e grupos geradores de combustão interna (ciclo Otto).

As turbinas a gás podem ser divididas em microturbinas, com potência de até 100 kW, e turbinas de médio e grande portes, atingindo potências de até 300 MW. Além destas, existem também as chamadas turbinas a vapor; porém, elas não utilizam diretamente um combustível para a queima, como nos casos das turbinas a gás, mas convertem a energia térmica do vapor proveniente de um sistema de cogeração (como uma caldeira a gás, por exemplo) em energia mecânica.

Já os motores de combustão interna são máquinas que transformam a energia térmica de um combustível em energia mecânica através do acionamento de pistões confinados em cilindros, sendo os ciclos de operação dos tipos Otto e diesel os mais comumente utilizados.

4.5.1.1 TURBINAS A GÁS

As turbinas a gás são equipamentos constituídos por compressor, câmara de combustão e a turbina de expansão (ciclo Brayton). O ar comprimido é injetado na câmara de combustão fornecendo o oxigênio para a queima do combustível. Esta reação exotérmica à alta pressão, transfere a energia química do combustível para os gases, elevando sua temperatura. O gás resultante é expandido na turbina, de onde se extrai a energia mecânica para o acionamento do compressor e da carga acoplada ao eixo.

A carga acoplada ao eixo (ou eixos) da turbina, além do compressor de ar do conjunto, pode ser constituída por gerador de energia elétrica, bombas, compressores ou um eixo motor qualquer. As turbinas de pequena e média potência giram a rotações mais elevadas. Dependendo da carga, pode ser necessário inserir um redutor de velocidade entre a turbina e sua carga.

Por razões de limitação de temperatura suportável pelos materiais utilizados na construção das turbinas, a massa de ar injetada na câmara de combustão é muito superior à quantidade requerida para se estabelecer a reação estequiométrica da combustão. Assim, os gases de exaustão da turbina contém ainda uma quantidade significativa de oxigênio.

Quanto mais elevadas forem a temperatura e a pressão dos gases na entrada do primeiro estágio da turbina, e quanto mais reduzida for a temperatura dos gases de exaustão, maior será a eficiência da turbina a gás. A evolução tecnológica tem promovido, nos últimos anos, o contínuo aperfeiçoamento dessas máquinas.

O compressor de ar consome uma parcela significativa da energia mecânica resultante da conversão da energia térmica dos combustíveis.

4.5.1.2 MICROTURBINAS A GÁS

As microturbinas para geração de energia elétrica são derivadas da tecnologia utilizada nas APUs (Airborne Power Units). Estas unidades são utilizadas para fornecer energia elétrica para os sistemas centrais de aviões quando estes estão no solo e com as turbinas principais desativadas. São pequenas turbinas, com potência de até 30 kW, operando com o ciclo Brayton, ou seja, utilizando o mesmo princípio de funcionamento das turbinas a gás de maior porte.

O ar atmosférico entra no compressor, onde sua pressão é elevada. A seguir, o ar comprimido segue para a câmara de combustão e, nesta câmara, o combustível é injetado e se mistura com o ar. A mistura é então inflamada por meio de queimadores. Os gases aquecidos e em alta pressão são expandidos através das pás da turbina, fazendo com que esta gire em alta velocidade. A turbina de expansão é montada no mesmo eixo do compressor e do gerador

elétrico. Assim, quando o ciclo se completa, a turbina de expansão é responsável por fornecer a energia necessária para girar o compressor e o gerador elétrico.

No caso dos sistemas estacionários, os gases, depois da expansão na turbina, ainda contém grande quantidade de energia térmica. Esta energia pode ser utilizada em trocadores de calor para, dependendo do sistema, produzir frio ou vapor de processo. Estes sistemas caracterizam um ciclo de cogeração.

4.5.1.3 TURBINAS A VAPOR

As turbinas a vapor são máquinas de combustão externa (os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho que escoar no interior da máquina e realiza os processos de conversão da energia do combustível em potência de eixo). Devido a este fato, apresentam uma flexibilidade em relação ao combustível a ser utilizado, podendo usar, inclusive, aqueles que produzem resíduos sólidos (cinzas) durante a queima.

Na turbina a vapor, o fluido de trabalho é vapor de água sob pressão e a alta temperatura. Como as turbinas a vapor são máquinas de combustão externa, o calor necessário para a ebulição do condensado e para o superaquecimento posterior deve ser transferido dos produtos de combustão ao fluido de trabalho, através de serpentinas no interior da caldeira.

As turbinas a vapor podem ser fabricadas sob uma extensa gama de configurações, para diversas pressões, diferentes números de estágios, de condensação, de extração simples e controlada, simples e múltiplas entradas etc.

São produzidas na faixa de potência desde poucos kW até pouco mais de 1.000 MW.

As turbinas a vapor podem ser “de condensação” ou de “contrapressão”:

- De condensação: o vapor sai da turbina a uma temperatura maior que a ambiente e a uma pressão um pouco menor; ao deixar a turbina, o vapor passa por um condensador

para voltar ao estado líquido e ser reaproveitado no ciclo; é o tipo mais comum em usinas termelétricas e nucleares.

- De contrapressão: o vapor não passa por um condensador ao sair da turbina; ele deixa a turbina ainda com certa pressão e temperatura e pode ser aproveitado em outras etapas de uma planta de processo químico, seja em aquecedores, destiladores, estufas, ou simplesmente é lançado na atmosfera; este tipo é muito usado em usinas petroquímicas, navios, plataformas de petróleo, entre outras instalações.

4.5.1.4 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Em 1867, Nikolaus August Otto, engenheiro alemão, desenvolveu o denominado ciclo Otto de quatro tempos, que, até hoje, é largamente utilizado em transportes.

O motor a óleo diesel surgiu em 1892 imaginado por outro engenheiro alemão, Rudolph Diesel. O motor a diesel é projetado para ser mais pesado e mais potente do que os motores a gasolina. Eles são usados em máquinas pesadas, locomotivas, navios e em alguns automóveis.

Os motores Otto e Diesel se aproximam do ciclo de combustão interna de ignição por centelha. Seu rendimento é função, apenas, da relação de compressão. Aplicam-se tanto para geração de energia elétrica, pelo acoplamento de um gerador ao motor, quanto à geração de energia mecânica, que pode ser empregada no acionamento de bomba hidráulica, compressor ou veículo.

A diferença básica entre o ciclo Otto e o Diesel está na forma em que ocorre a combustão. No ciclo Diesel, a combustão se dá pela compressão do combustível na câmara de combustão, enquanto no ciclo Otto a combustão ocorre pela explosão do combustível através de uma centelha na câmara de combustão. O ciclo Otto consiste em expansão/resfriamento adiabático, seguido de resfriamento a volume constante, aquecimento/compressão adiabático e aquecimento a volume constante. A válvula de entrada de ar abre no tempo preciso para permitir a entrada de ar (misturado ao combustível) no cilindro. A vela dá ignição à mistura no cilindro, o que cria a explosão. A força da explosão é transferida ao pistão. O pistão desce e sobe em um movimento periódico. A força do pistão é transferida através da manivela para o eixo de transmissão. (Costa, 2006)

4.5.2 COGERAÇÃO

A cogeração é definida como o processo de transformação de energia térmica de um combustível em mais de uma forma de energia útil. As formas mais frequentes de energia útil são as energias mecânica e térmica. A energia mecânica pode ser utilizada diretamente no acionamento de equipamentos ou para geração de energia elétrica. A energia térmica é utilizada diretamente no atendimento das necessidades de calor para processos, ou indiretamente na produção de vapor ou na produção de frio.

4.5.2.1 CALDEIRAS E EQUIPAMENTOS DE ENERGIA TÉRMICA

As caldeiras são equipamentos construídos para aquecer um fluido ou produzir vapor a partir da queima de combustíveis. Nas caldeiras para vapor d'água, de acordo com as necessidades do processo, o vapor pode ser produzido nas condições de saturação ou superaquecido.

As caldeiras de combustão utilizam uma extensa gama de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Já as caldeiras de recuperação são equipamentos destinados ao aproveitamento do calor residual de algum sistema ou processo, para a geração de vapor ou para aquecimento de algum fluido.

As caldeiras são muito utilizadas em cogeração de energia elétrica e térmica, para recuperar a energia residual dos gases de exaustão de turbinas a gás ou de motores alternativos.

Nas aplicações de recuperação de calor de turbinas a gás, na configuração de geração elétrica em ciclo combinado, este equipamento pode ser muito sofisticado, com múltiplas pressões e circuitos complexos de troca de calor. Nas aplicações que exigem maior produção de vapor, maior pressão e temperatura, ou maior flexibilidade de operação, são, algumas vezes, dotados de queima suplementar de combustível, exaurindo ou não o oxigênio residual da queima do combustível da turbina a gás. Dependendo da quantidade de combustível adicional, pode ser necessária a adição de ar para a queima. Quando possível, utiliza-se como suplementar outro combustível mais barato que o da turbina a gás.

Os motores de combustão interna permitem outras formas de recuperação de energia além da contida nos gases de exaustão. Os circuitos de refrigeração das camisas e o sistema de resfriamento de óleo são duas outras fontes de energia recuperáveis (com temperaturas menores que a dos gases de exaustão). Nos motores dos grupos geradores, a recuperação da energia residual dos gases é feita com caldeiras mais simples em razão do seu conteúdo energético. Nos demais circuitos, a recuperação é feita com trocadores de calor líquido-líquido.

4.5.2.2 TIPOS DE COGERAÇÃO

A partir da fonte de calor disponível para a cogeração, esta pode ser classificada em dois grandes grupos (ou tipos):

- a cogeração de “bottoming”;
- a cogeração de “topping”.

Na cogeração de “bottoming”, o processo utiliza a energia a temperaturas mais elevadas e a energia cogerada é o resultado da recuperação do calor residual do processo. Na cogeração de “topping”, a energia utilizada (acionamento) é extraída no nível mais alto da temperatura da combustão, e a energia recuperada (cogerada) no nível mais baixo.

4.5.3 CICLOS DE COGERAÇÃO

A escolha de um dos sistemas apresentados a seguir, que permitem diferentes configurações, deve levar em conta a viabilidade técnico-econômica, as necessidades estratégicas e outras variáveis como disponibilidade de água, espaço, combustível, condições ambientais etc.

4.5.3.1 CICLO DE COGERAÇÃO COM TURBINAS A VAPOR

Neste ciclo de cogeração, a energia térmica resultante da combustão é transferida, através de caldeira, para a água que vaporiza e superaquece. O vapor superaquecido é expandido em uma turbina que aciona uma carga mecânica (ou gerador elétrico). O vapor é

extraído na saída da turbina, nas condições de temperatura e pressão requeridas para o processo que utiliza este calor útil. Geralmente, o fluido é devolvido à caldeira no estado de condensado para reiniciar o ciclo de transferência de energia.

Este ciclo de cogeração permite a utilização de combustíveis mais baratos, como resíduos industriais, carvão, lenha, bagaço de cana, biogás, entre outros, muitas vezes os únicos disponíveis no local.

4.5.3.2 CICLO DE COGERAÇÃO COM TURBINAS A GÁS

Na saída da turbina a gás, os gases de exaustão apresentam ainda uma temperatura relativamente elevada, da ordem de 380 a 600 °C. Esses gases possuem um elevado conteúdo energético: de 50 a 70% da energia contida no combustível. A cogeração se baseia no aproveitamento de parte desta energia. Dependendo das características da carga térmica, o aproveitamento pode ser maior ou menor. Os processos que utilizam temperaturas mais baixas podem aproveitar mais energia residual dos gases de exaustão. Os usos mais frequentes para esta energia são: a utilização dos gases quentes para secagem, geração de vapor através de uma caldeira de recuperação, aquecimento de fluido térmico etc.

4.5.3.3 GERAÇÃO ELÉTRICA COM CICLO COMBINADO

O ciclo combinado é o processo de produção de energia elétrica utilizando turbinas a gás e turbinas a vapor. O combustível é queimado em uma turbina a gás e a energia contida nos gases de exaustão produz vapor em uma caldeira de recuperação. O vapor da caldeira de recuperação aciona uma turbina a vapor de condensação. Tanto a turbina a gás quanto a turbina a vapor acionam geradores para produção de energia elétrica, que é a única forma de energia útil retirada do sistema.

Este ciclo prioriza a eficiência de conversão da energia do combustível para a energia elétrica. As grandes instalações em ciclo combinado atingem, atualmente, eficiências superiores a 55%.

4.5.3.4 COGERAÇÃO COM CICLO COMBINADO

Esta forma de cogeração é utilizada nas situações em que se deseja produzir energia elétrica e energia térmica úteis em quantidades variáveis de acordo com as cargas consumidoras ou para atendimento de mercados específicos. Constitui-se, basicamente, de um ciclo combinado com flexibilização da geração elétrica e de energia térmica (normalmente vapor) através da extração de vapor na turbina a vapor, condensação parcial e queima suplementar de combustível na caldeira de recuperação. Existem instalações tão flexíveis que podem operar desde a produção máxima de energia elétrica, sem extração de vapor para o processo industrial, até a produção máxima de vapor para processo sem produção de energia elétrica.

Outra forma de cogeração deste tipo é aquela em que os acionamentos são de equipamentos mecânicos (bombas, compressores etc.) em vez de geradores elétricos.

A queima adicional de combustíveis pode reduzir os custos globais de operação, em determinadas situações, por utilizar combustíveis mais baratos. A eficiência pode ser muito elevada, dependendo do balanço de massa e da energia que se obtém em certos projetos.

4.5.3.5 CICLO DE COGERAÇÃO COM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Este ciclo de cogeração utiliza motores alternativos de combustão interna, produzindo trabalho (energia elétrica ou acionamento mecânico), recuperando a energia térmica residual dos gases de exaustão e, eventualmente, o calor dos sistemas de lubrificação e resfriamento das camisas dos pistões.

A quantidade de energia residual recuperada não chega a ser muito expressiva; por isso, sua aplicação mais frequente é nas instalações que necessitam de pequenas quantidades de calor a temperatura moderada e maiores quantidades de energia elétrica ou força motriz.

São comuns instalações de cogeração, utilizando este ciclo, nas potências de poucas dezenas de kW até potências da ordem de 20 MW ou pouco mais.

4.5.4 ANÁLISE TÉCNICA COMPARATIVA ENTRE AS TECNOLOGIAS

Embora os motores, de um modo geral, possuam maior eficiência de conversão elétrica, as turbinas a gás podem apresentar um aumento de sua eficiência global de conversão, quando operadas em sistemas de cogeração (calor e eletricidade). Além disso, é possível perceber que a taxa de emissão de gases de nitrogênio (de grande impacto no efeito estufa) nas turbinas e microturbinas é muito menor se comparada com a dos motores. Sendo assim, a grande vantagem da utilização deste tipo de tecnologia, em particular a da microturbina, está diretamente vinculada ao ganho ambiental, quando comparada com a tecnologia de grupos geradores de combustão interna (ciclo Otto).

Outra alternativa tecnológica é a conversão de motores ciclo Diesel para ciclo Otto, por meio da substituição dos bicos injetores por velas de ignição, além de outras adaptações necessárias. Este tipo de adaptação era comum nos anos 1970, época em que os motores a gás eram muito raros. A vantagem da adaptação era tirar proveito da alta taxa de compressão dos motores Diesel para compensar o baixo poder calorífico do biogás.

Atualmente, além da alta disponibilidade de motores a gás, os motores ciclo Otto apresentam taxas de compressão próximas das dos motores Diesel, a um custo inferior. (Costa, 2006)

4.6 GERAÇÃO DE CALOR

A necessidade de aquecimento dos digestores é uma das principais demandas de energia numa ETE. Na digestão mesofílica, a faixa de temperatura recomendada é de 32°C a 38°C, enquanto a digestão termofílica adota a faixa de 50°C a 60°C. A digestão mesofílica é a mais praticada no Brasil, quase sempre sem aquecimento dos digestores que, assim sendo, mantêm uma temperatura do lodo em seu interior em torno de 26°C a 30°C, ou menos, dependendo do mês e da localidade. Nesses casos, a eficiência de destruição de SSV se reduz.

Na América Latina, as grandes ETEs situadas em locais mais frios já estão adotando o aquecimento e controle da temperatura dos digestores, como é o caso, por exemplo, das estações de Barueri (São Paulo), La Farfana (Santiago) e San Fernando (Medellín).

O principal sistema de aquecimento usado tem sido através de trocadores externos de calor, em que a tubulação de lodo afluente ao digestor é concêntrica a outra tubulação externa por onde circula água quente em sentido de contracorrente. Em casos como esse, pode-se admitir um coeficiente de transferência de calor entre 3.000 e 5.640 kJ/kgST.°C. A água quente que circula na tubulação externa é normalmente produzida em uma caldeira que usa o biogás como combustível; a eficiência de aproveitamento do poder calorífico do biogás pode ser de até 80%. A caldeira também pode utilizar óleo combustível ou gás comercial.

Nos casos em que há cogeração de energia, com o biogás sendo usado em motores e turbinas para gerar eletricidade, tem sido possível aproveitar o calor residual gerado para satisfazer a necessidade de aquecimento. Um exemplo recente de projeto de cogeração de energia é o da ETE Arrudas, em Sabará (Minas Gerais): o biogás gerado nos reatores UASB (reator anaeróbio seguido de pós-tratamento aeróbio) é tratado para remoção de impurezas e queimado em microturbinas, gerando eletricidade e calor. O calor é aproveitado para aquecimento dos reatores anaeróbios.

A transferência de calor se dá sobre o lodo afluente aos digestores, podendo-se estimar o calor (energia) apenas necessário para aquecer o lodo afluente de acordo com a equação:

$$C = Q_L \times C_E \times (T_D - T_L)$$

onde:

C = calor (energia) necessário para aquecer o lodo, kJ/d

Q_L = massa de lodo afluente ao digestor, kgST/d

C_E = coeficiente de transferência de calor por área = 4,2 kJ/kg.°C

T_D = temperatura no interior do digestor, °C

T_L = temperatura do lodo afluente ao digestor, °C

(Jordão, 2011)

4.7 SECAGEM TÉRMICA

A separação entre as fases líquida e sólida nos processos de tratamento dos lodos gerados em ETEs é uma tarefa difícil e dispendiosa, comparada às demais operações do tratamento de esgotos. Os métodos mecânicos de separação entre líquido e sólido, comumente

chamados de desidratação mecânica ou, ainda, desaguamento, podem ser feitos através de: filtros prensa, filtros prensa de esteira e centrifugadoras. Com esses processos, consegue-se obter teores de sólidos na faixa de 20 a 30%, podendo chegar a 40% com a utilização de cal na etapa de condicionamento.

A secagem térmica de lodos ou biossólidos é um processo de redução de umidade através da evaporação de água para um meio insaturado e, deste, para a atmosfera com a aplicação de energia térmica. É um processo de operação relativamente cara, pois, além de envolver a utilização de combustível para a geração de calor, necessita de mão de obra especializada para manuseio e controle. Na secagem térmica, o lodo é aquecido para promover a evaporação da água. Esse aquecimento é conduzido até um ponto inferior ao de destruição da matéria orgânica. Dessa forma, os sólidos totais presentes são mantidos praticamente inalterados, apenas a água é removida.

O objetivo principal da secagem térmica é a redução da quantidade de água presente na massa do lodo, com o propósito de diminuir o custo de transporte caso esse material necessite ser transportado para outro local. Com a secagem térmica podem ser obtidos teores de sólidos da ordem de 90 a 95%, reduzindo significativamente o volume do lodo gerado; para tanto, o biogás pode ser usado como combustível.

Outro objetivo da secagem térmica é a destruição dos organismos patogênicos que se mantêm presentes nos lodos mesmo após os processos de estabilização. Com a redução do volume e da umidade, a secagem térmica promove melhoria nas condições para armazenamento e embalagem, facilitando a eventual comercialização do lodo.

Os fatores de maior importância na secagem térmica do lodo, objetivando aplicá-lo na agricultura, são a preservação da matéria orgânica nele existente e a destruição dos organismos patogênicos. O processo de secagem térmica pode ser visto não apenas como uma etapa do tratamento do lodo para disposição final, mas, também, como um meio para a fabricação de um produto: o biossólido para utilização na agricultura. (David, 2002)

4.8 INCINERAÇÃO

O objetivo da incineração é a redução volumétrica do lodo, por meio da conversão de sólidos fixos em cinzas e da matéria orgânica (sólidos voláteis) em CO₂, H₂O e SO₂. As cinzas, após resfriamento por umidificação para a não formação de poeiras, são dispostas em aterros sanitários ou podem ser aproveitadas como material agregado para a construção civil.

A incineração ocorre mediante temperaturas da ordem de 800°C a 1.100°C, sendo maior a redução volumétrica do lodo e a conversão em cinzas quanto maior for a temperatura de incineração empregada. Como referência, a redução volumétrica a partir da incineração de 1 tonelada de lodo úmido (aproximadamente 1 m³) é capaz de resultar em 200 kg de cinzas.

A principal fonte combustível da incineração é o próprio poder calorífico dos sólidos voláteis; complementarmente, dependendo do balanço energético, o biogás e o gás natural devem também ser utilizados como combustíveis auxiliares para a queima. Para a completa combustão do conteúdo orgânico do lodo, no qual predominam carbono, hidrogênio, enxofre e nitrogênio, é requerida quantidade suficiente de oxigênio, e, portanto, ar atmosférico comprimido é também introduzido na câmara de incineração.

Os gases quentes emitidos na incineração são usualmente aproveitados na própria ETE para aquecimento de outros fluidos, via trocador de calor, ou para a geração de vapor em unidades subsequentes de aproveitamento de energia térmica (caldeiras) e, conseqüentemente, geração de energia elétrica por meio de motores de combustão interna ou turbinas. O controle das emissões atmosféricas e dos odores gerados a partir da queima dos gases quentes da incineração e das caldeiras ocorre por meio do emprego de ciclones, lavadores de gases ou precipitadores eletrostáticos. Em qualquer dos casos, esses dispositivos devem atender aos padrões de emissão atmosférica vigentes. (Volschan Jr., 2009)

5 MODALIDADES PARA O APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

As diferentes modalidades para o aproveitamento e/ou a geração de energia são diretamente dependentes das soluções empreendidas para o tratamento do lodo (como estabilização, secagem térmica e incineração), podendo estas ser exclusivamente implantadas ou combinadas entre si mediante diferentes arranjos e possibilidades, como ilustra a Figura 1 abaixo, lembrando que a digestão do tipo mesofílica é aquela realizada a uma temperatura compreendida entre 32°C e 38°C (a faixa da digestão termofílica é de 50°C a 60°C).

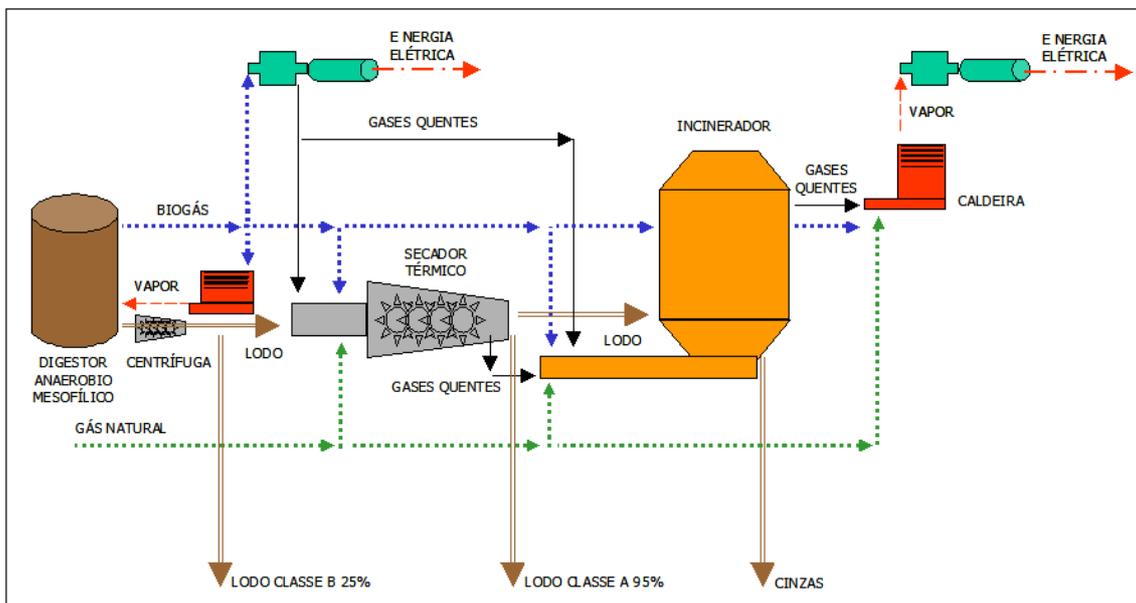


Figura 1: Opções para o aproveitamento e/ou geração de energia a partir do lodo 25% TS e classe B
Fonte: Volschan Jr., 2009

Obs.:

1ª) TS é o teor de sólidos.

2ª) As classes de lodo são as que constam na Resolução CONAMA nº 375/2006 (V. Anexo A desta Dissertação).

Caso o lodo seja somente estabilizado e desidratado mecanicamente (com teor de sólidos de 25% e classe B), é possível aproveitar o biogás em benefício da própria etapa de digestão anaeróbia e/ou para a geração de energia elétrica por meio de motores de combustão interna, turbinas ou células combustíveis.

A digestão anaeróbia do tipo mesofílica (32 a 38 °C), com aproveitamento do biogás gerado para o aquecimento do lodo a ser digerido (ou do próprio digestor), é mostrada no desenho esquemático da Figura 2.



Figura 2: Aproveitamento do biogás somente em benefício da etapa de digestão anaeróbia
 Fonte: Volschan Jr., 2009

É possível o biogás ser também aproveitado para a geração de energia elétrica, como mostra o desenho esquemático da Figura 3.

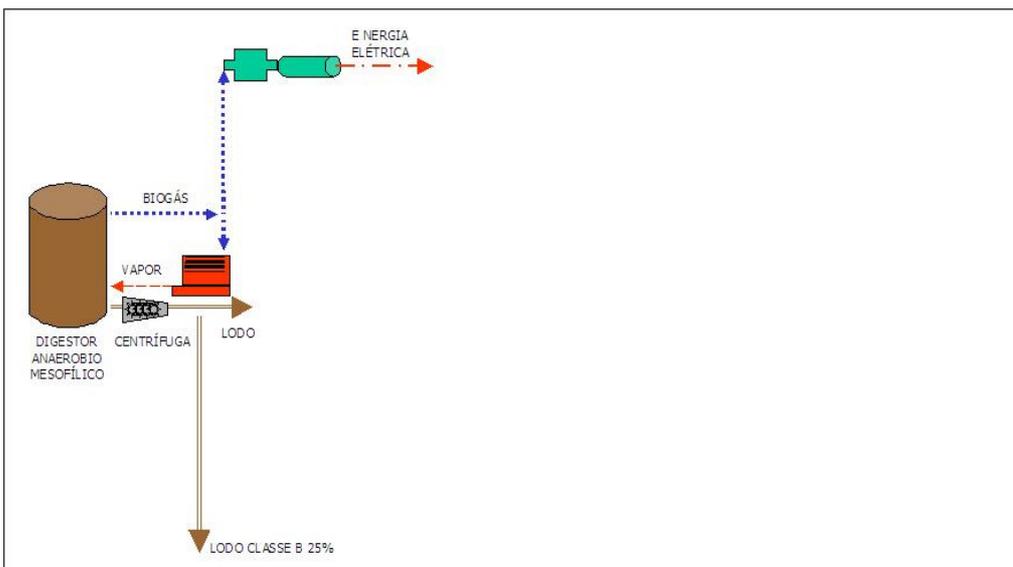


Figura 3: Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia e para a geração de energia elétrica
 Fonte: Volschan Jr., 2009

O biogás pode também ser exclusivamente utilizado para a geração de energia elétrica, como indica o desenho esquemático da Figura 4, ou até mesmo como combustível de veículos automotores.

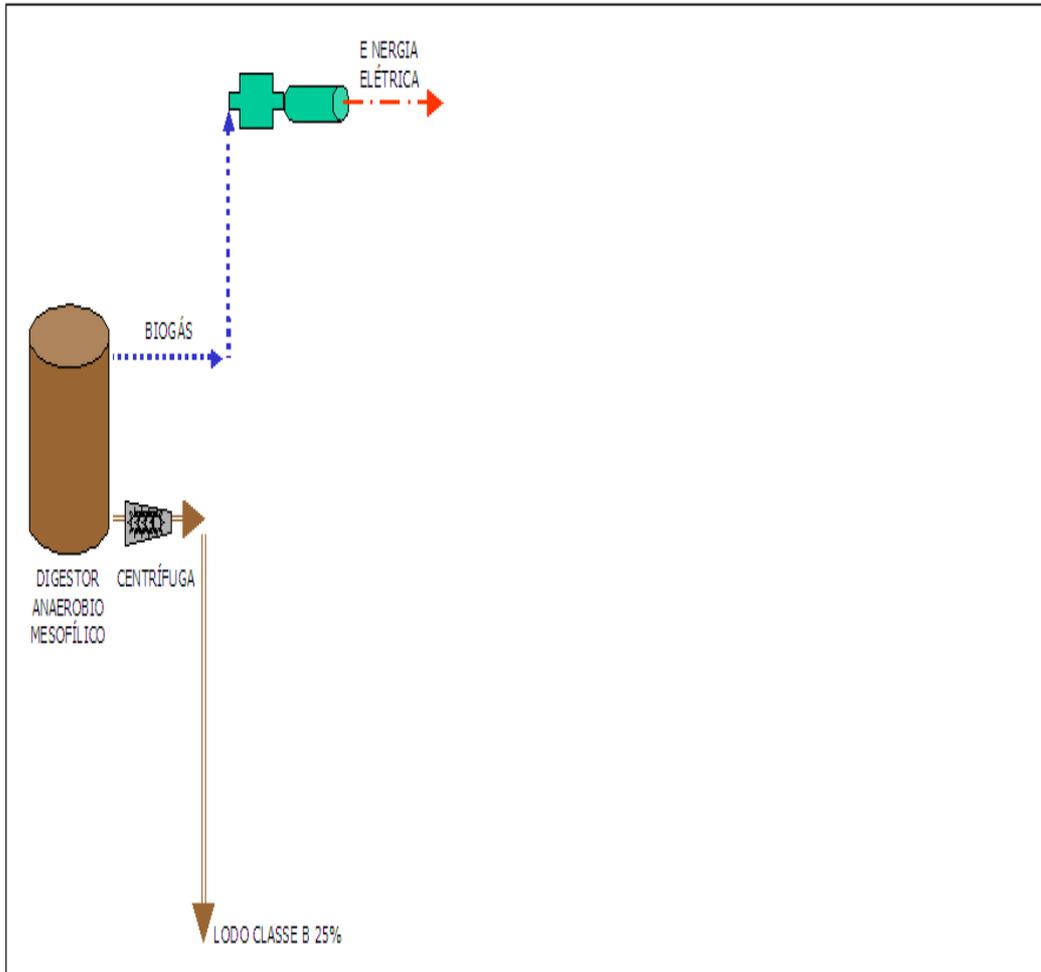


Figura 4: Aproveitamento do biogás somente para a geração de energia elétrica
 Fonte: Volschan Jr., 2009

Quando empregada a secagem térmica, a qual possibilita o alcance de até 95% de teor de sólidos e lodo com qualidade tipo Classe A, é usual aproveitar-se o biogás gerado na digestão anaeróbia como fonte exclusiva de combustível ou como fonte complementar ao gás natural. Quanto mais o biogás for aproveitado em benefício da etapa de digestão anaeróbia, ou utilizado para a geração de energia elétrica, maior deverá ser a quantidade de gás natural requerida para a secagem térmica. No caso da utilização do biogás para a geração de energia elétrica, os gases quentes dos motores de combustão interna/turbinas, a temperaturas de até 500 °C, podem ser aproveitados como fonte de calor para a secagem térmica.

Os desenhos esquemáticos das Figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10 ilustram as possibilidades de aproveitamento e de geração de energia elétrica combinada ao emprego da secagem térmica. A exequibilidade de cada uma das opções depende do seu respectivo balanço energético.

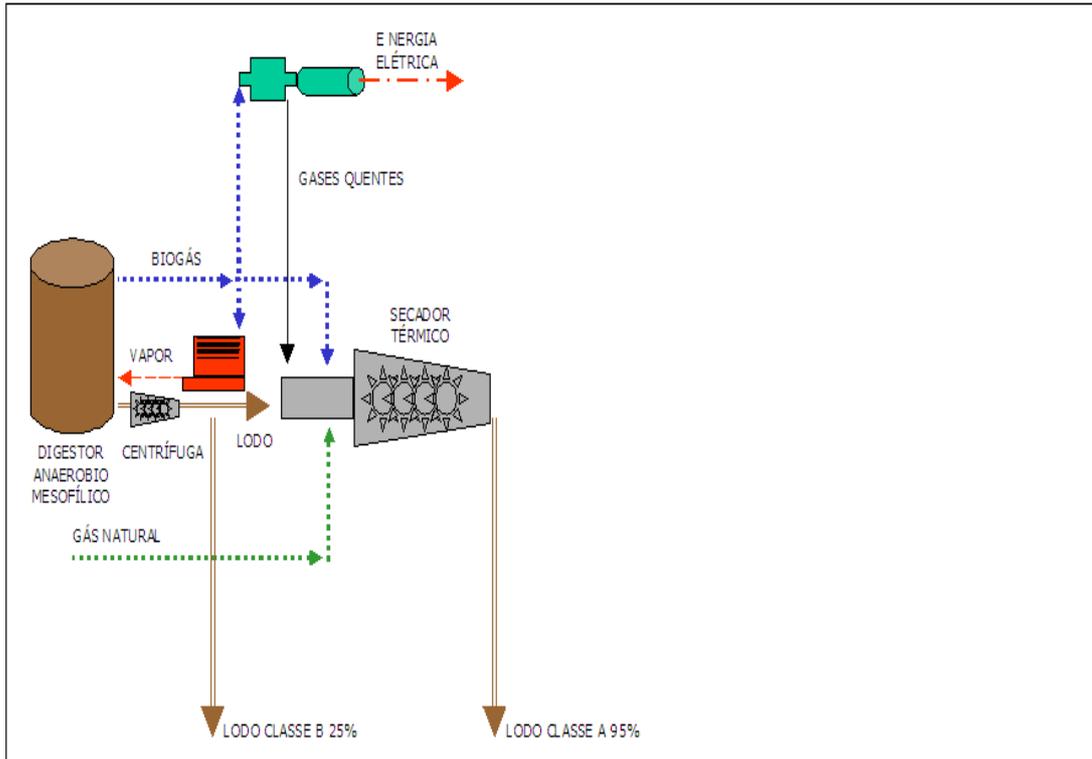


Figura 5: Opções para o aproveitamento e/ou geração de energia combinada ao emprego da secagem térmica
Fonte: Volschan Jr., 2009

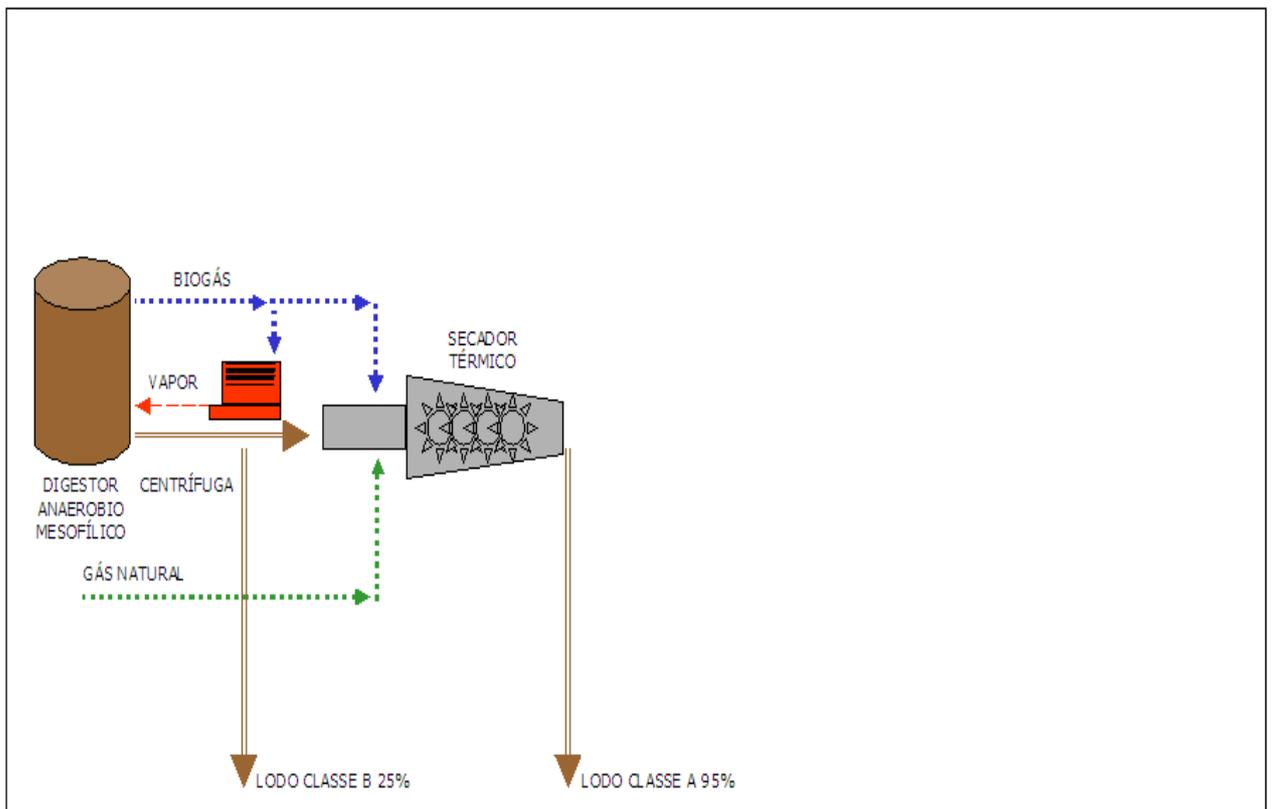


Figura 6: Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia e como combustível para a secagem térmica, complementar ao gás natural
Fonte: Volschan Jr., 2009

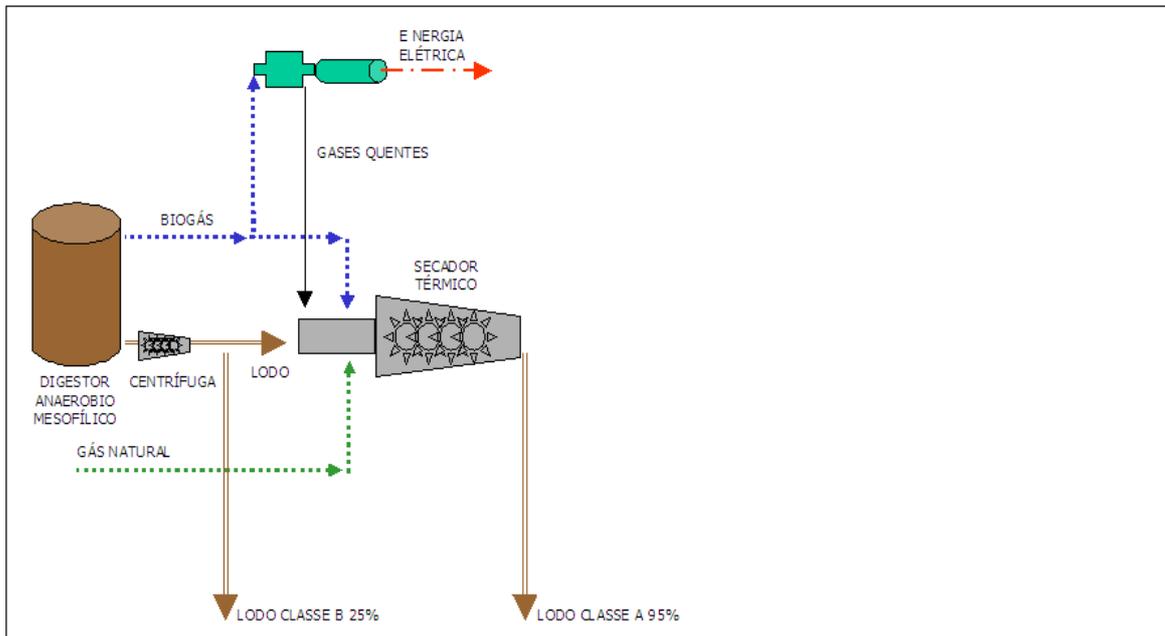


Figura 7: Aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica e como combustível para a secagem
 Fonte: Volschan Jr., 2009

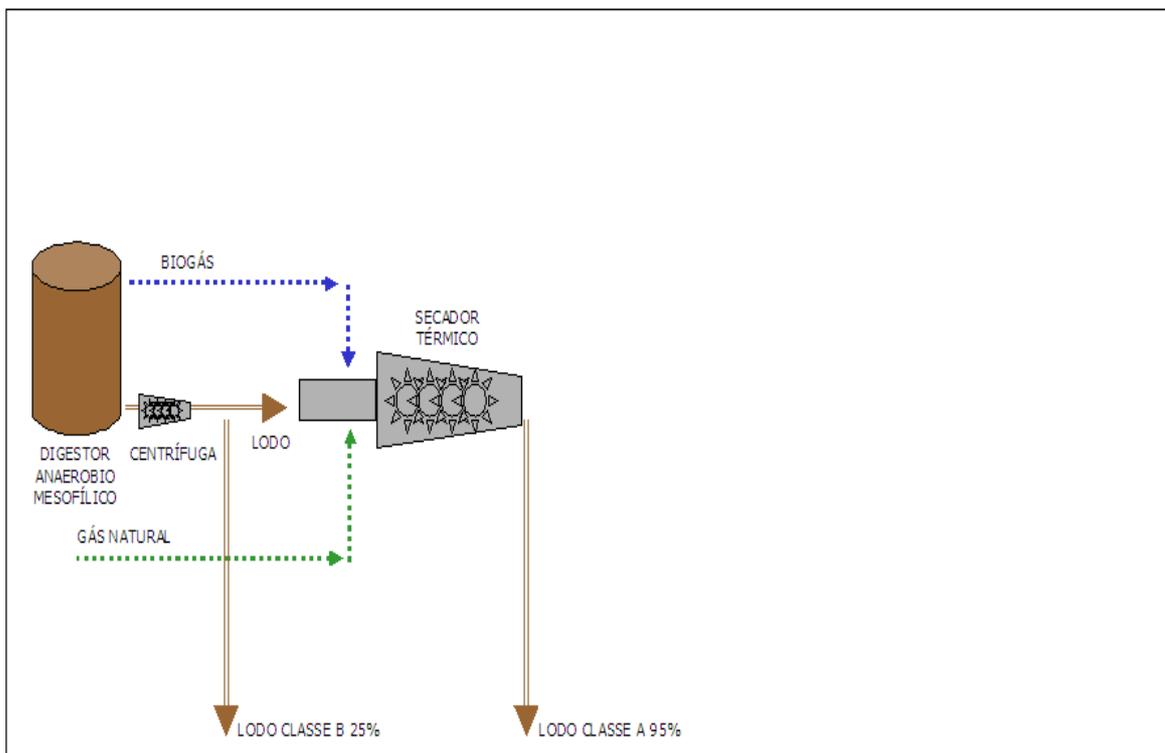


Figura 8: Aproveitamento do biogás exclusivamente como combustível para a secagem térmica, complementar ao gás natural
 Fonte: Volschan Jr., 2009

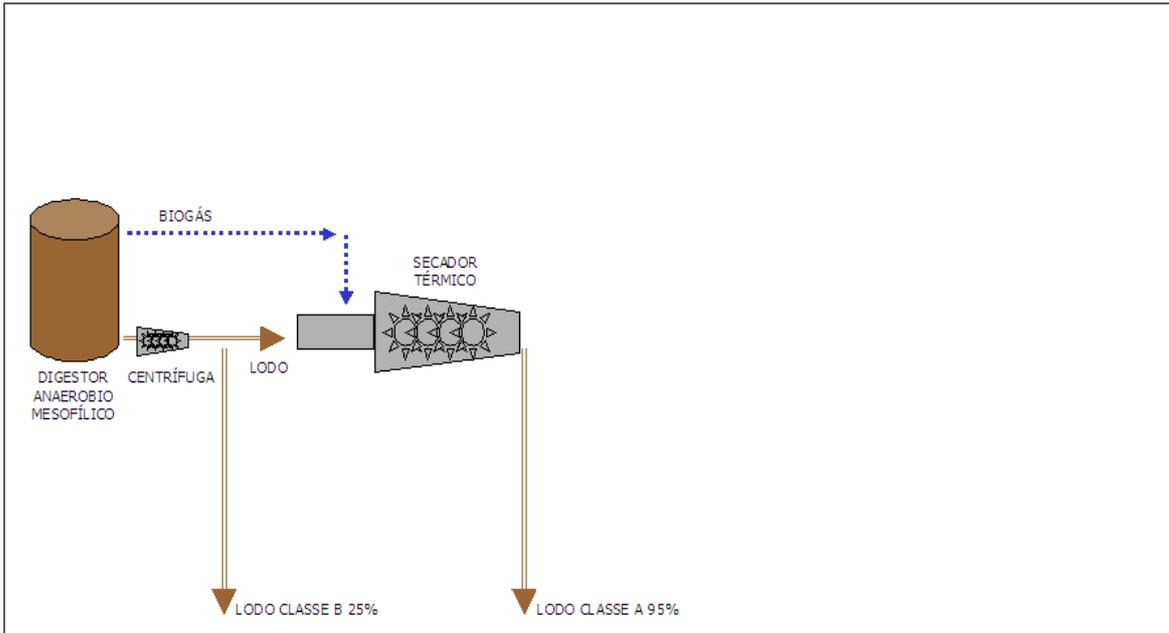


Figura 9: Aproveitamento do biogás somente como combustível exclusivo para a secagem térmica
 Fonte: Volschan Jr., 2009

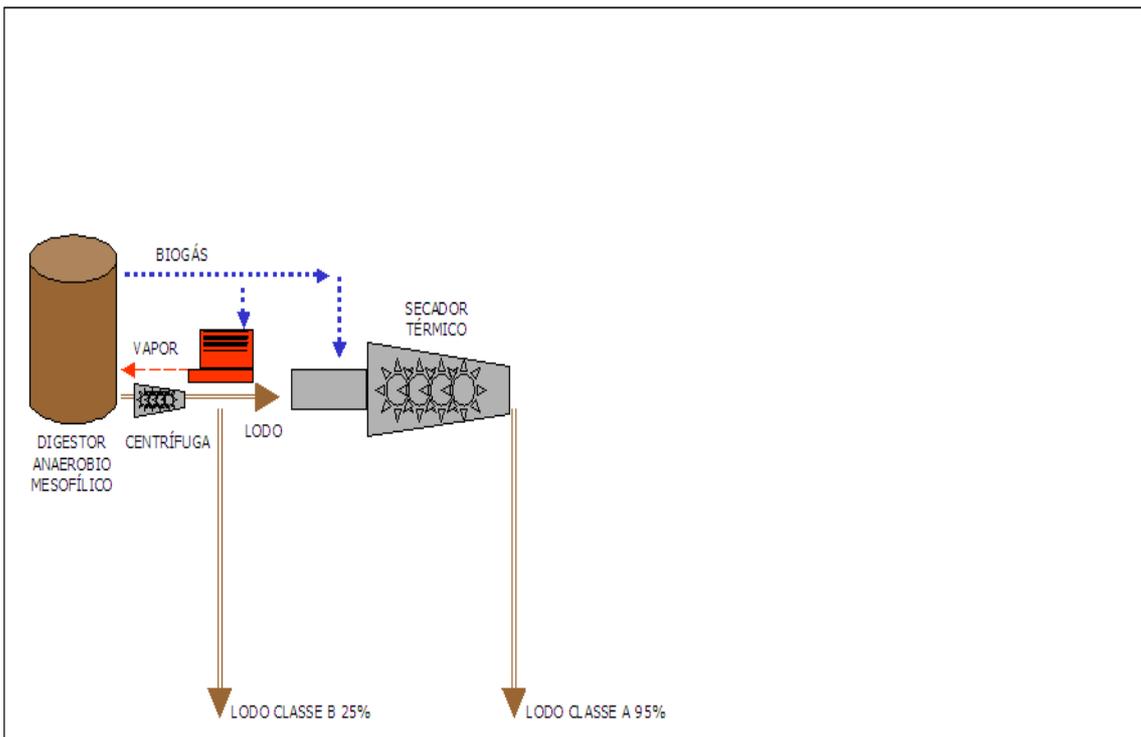


Figura 10: Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbica e como combustível exclusivo para a secagem térmica
 Fonte: Volschan Jr., 2009

Quando empregada a incineração, na qual se obtêm cinzas inertes como resultado da queima dos sólidos do lodo, é usual aproveitar-se o biogás gerado na digestão anaeróbica

como fonte exclusiva de combustível ou como fonte complementar ao gás natural. Da mesma forma, entende-se que quanto mais biogás for aproveitado em benefício da etapa de digestão anaeróbia, ou utilizado para a geração de energia elétrica, ou utilizado como combustível na etapa de secagem térmica, maior deverá ser a quantidade de gás natural requerida para a incineração. Somente o cotejamento técnico e econômico entre as diferentes modalidades possíveis de aproveitamento e de geração de energia é que pode, em cada caso, definir a melhor solução.

Observa-se que não somente os gases quentes dos motores de combustão/turbinas podem ser aproveitados como fonte de calor para a incineração, mas também os gases quentes da própria secagem térmica. Ressalta-se, ainda, que entre os gases quentes dos motores de combustão/turbinas haverá oxigênio em quantidade para a combustão dos compostos orgânicos presentes no lodo.

É usual o aproveitamento dos gases quentes da incineração, combinado ao uso auxiliar de biogás e de gás natural, para a geração de vapor em unidade subsequente de recuperação de energia térmica (caldeira), e, conseqüentemente, geração de energia elétrica em motores de combustão interna/turbinas.

Os desenhos esquemáticos das Figuras 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 ilustram as possibilidades de aproveitamento e de geração de energia elétrica, combinada ao emprego da secagem térmica e da incineração. A exequibilidade de cada uma das opções depende do seu respectivo balanço energético.

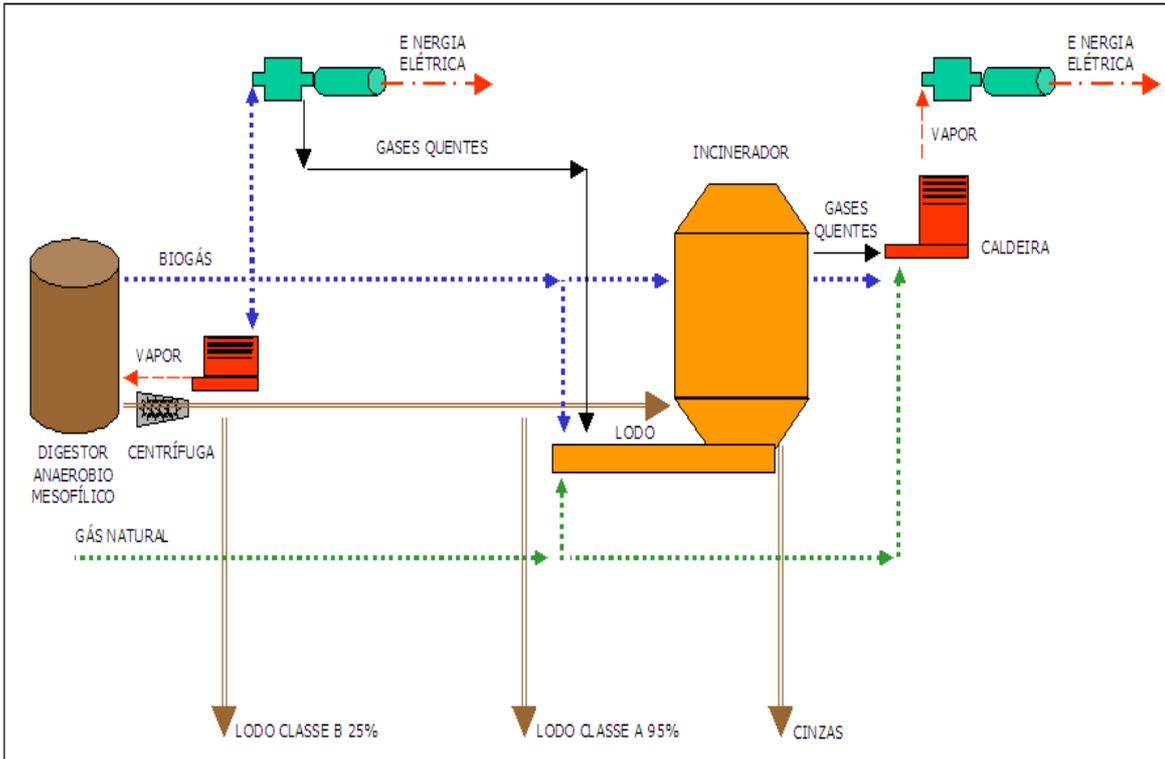


Figura 11: Opções para o aproveitamento e/ou geração de energia combinada ao emprego da incineração
 Fonte: Volschan Jr., 2009

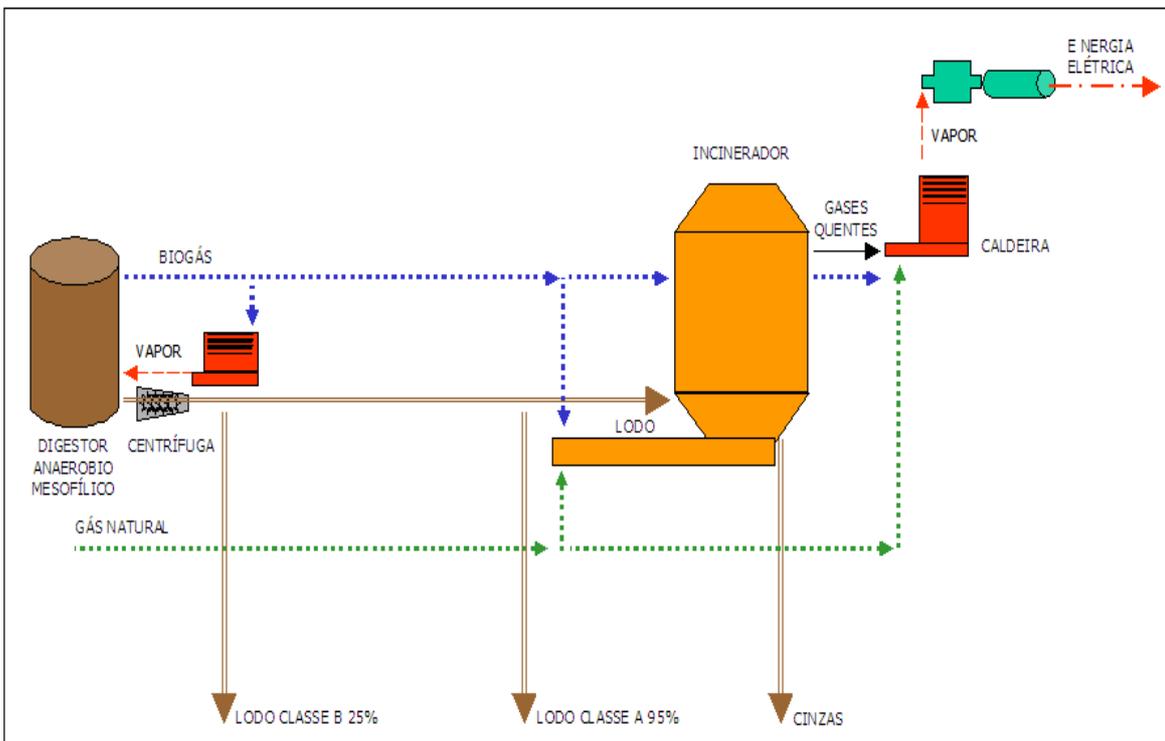


Figura 12: Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbica e como combustível para a incineração, complementar ao gás natural
 Fonte: Volschan Jr., 2009

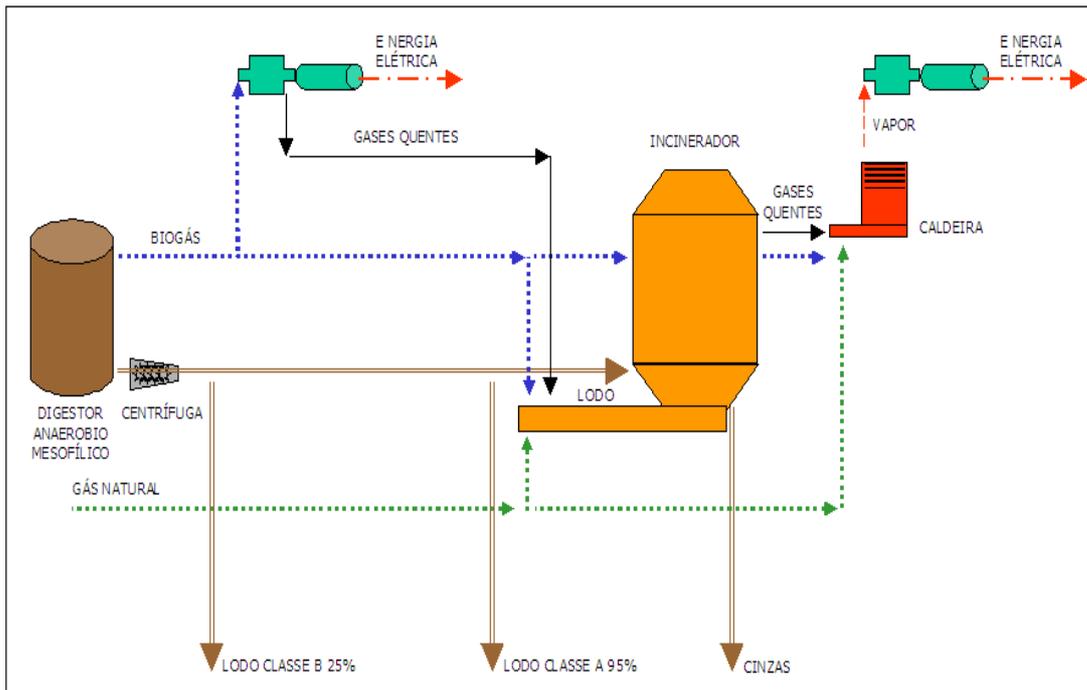


Figura 13: Aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica e como combustível para a incineração, complementar ao gás natural

Fonte: Volschan Jr., 2009

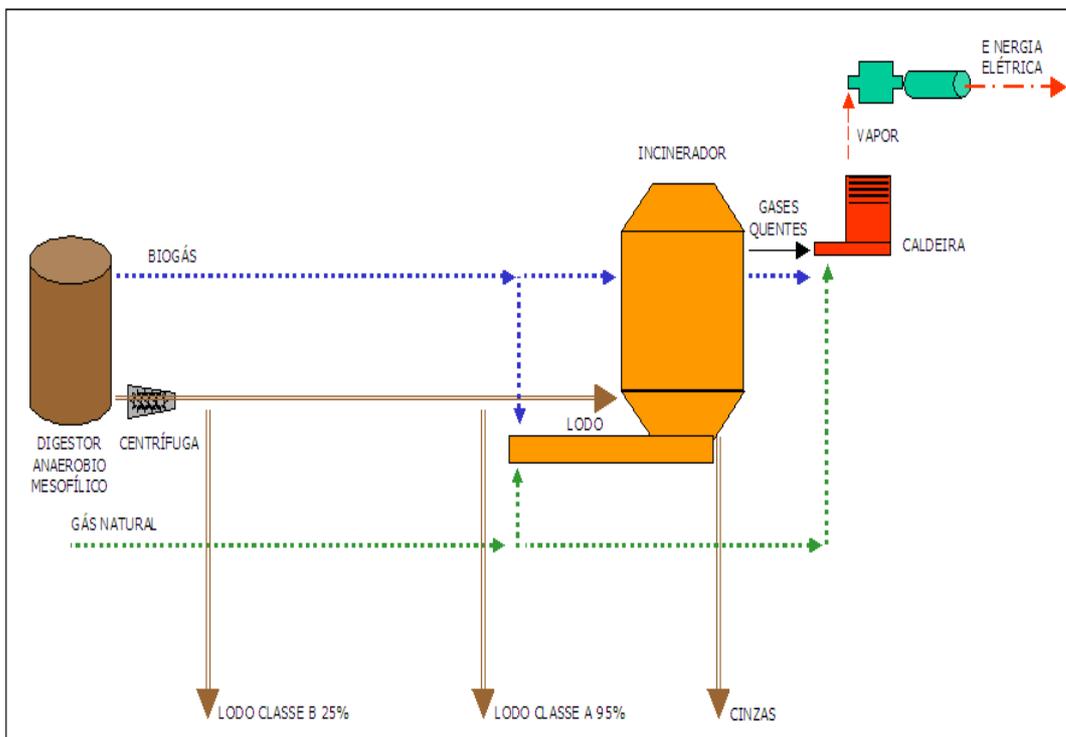


Figura 14: Aproveitamento do biogás somente como combustível para a incineração, complementar ao gás natural

Fonte: Volschan Jr., 2009

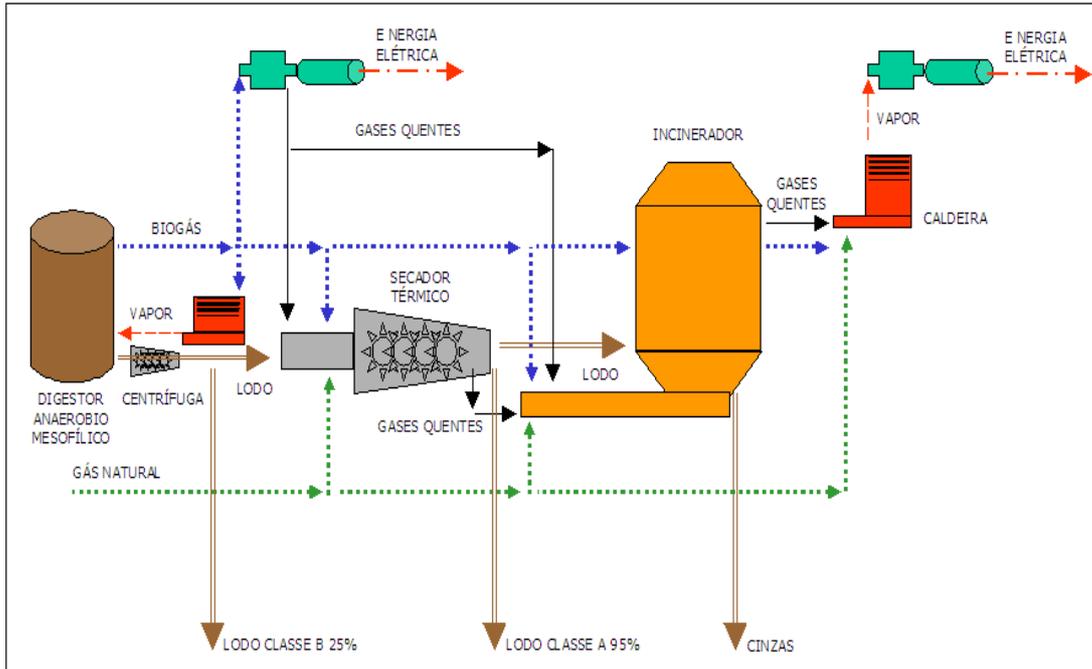


Figura 15: Opções para o aproveitamento e/ou geração de energia combinada ao emprego da secagem térmica e da incineração
 Fonte: Volschan Jr., 2009

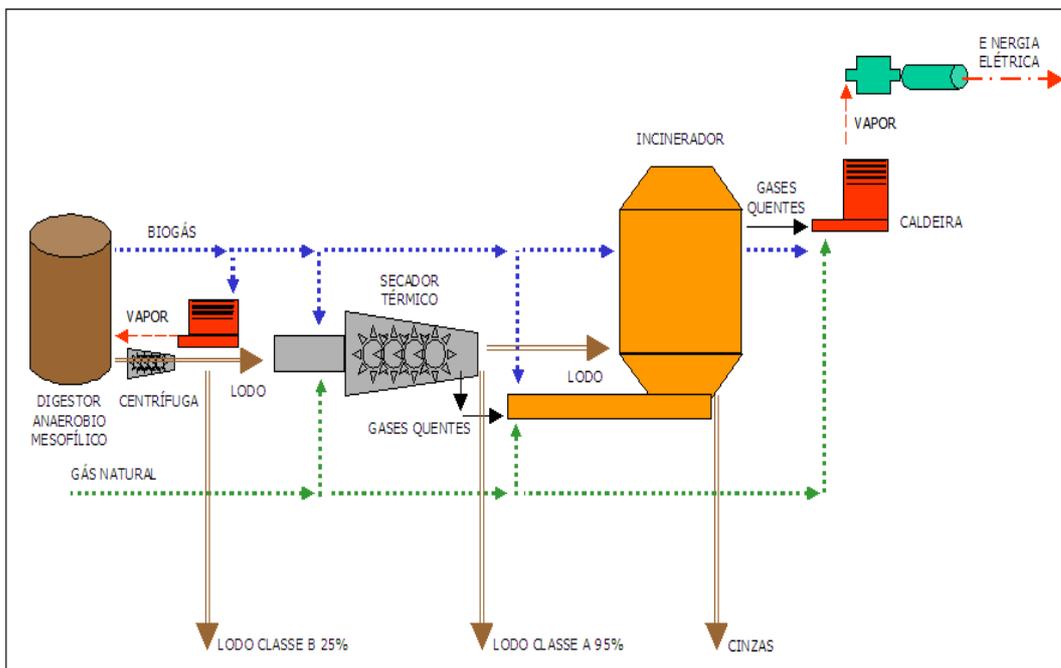


Figura 16: Aproveitamento do biogás em benefício da digestão anaeróbia e como combustível para a secagem térmica e a incineração, complementar ao gás natural
 Fonte: Volschan Jr., 2009

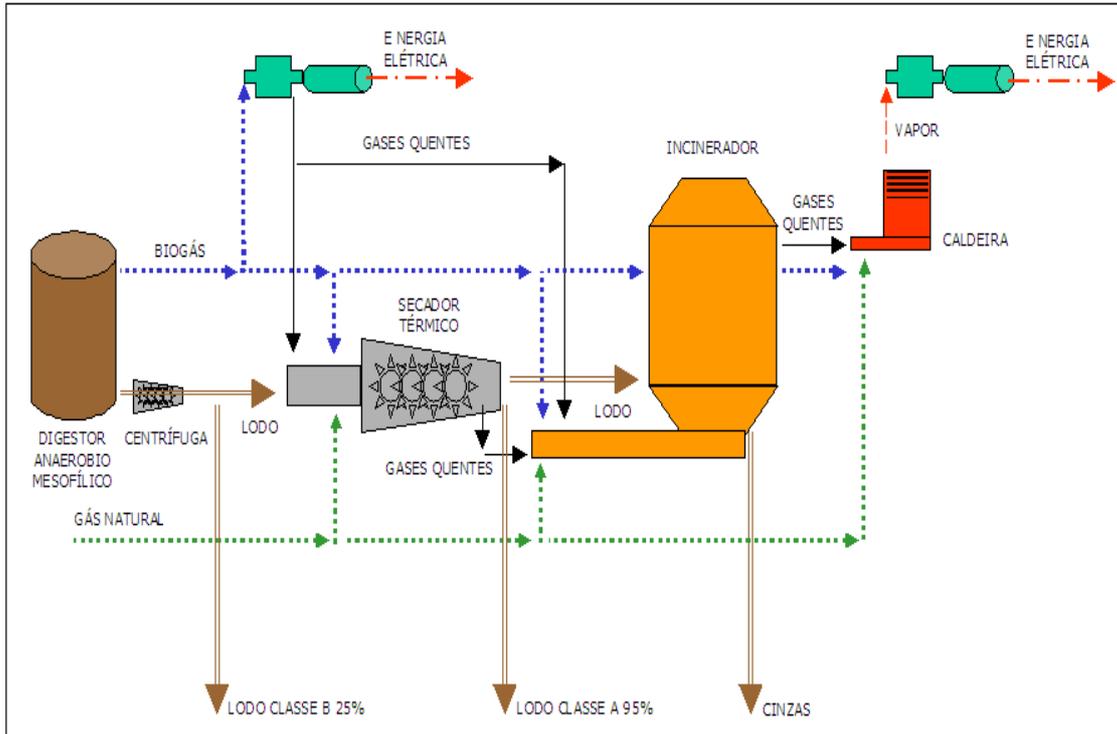


Figura 17: Aproveitamento do biogás para a geração de energia e como combustível para a secagem térmica e a incineração, complementar ao gás natural

Fonte: Volschan Jr., 2009

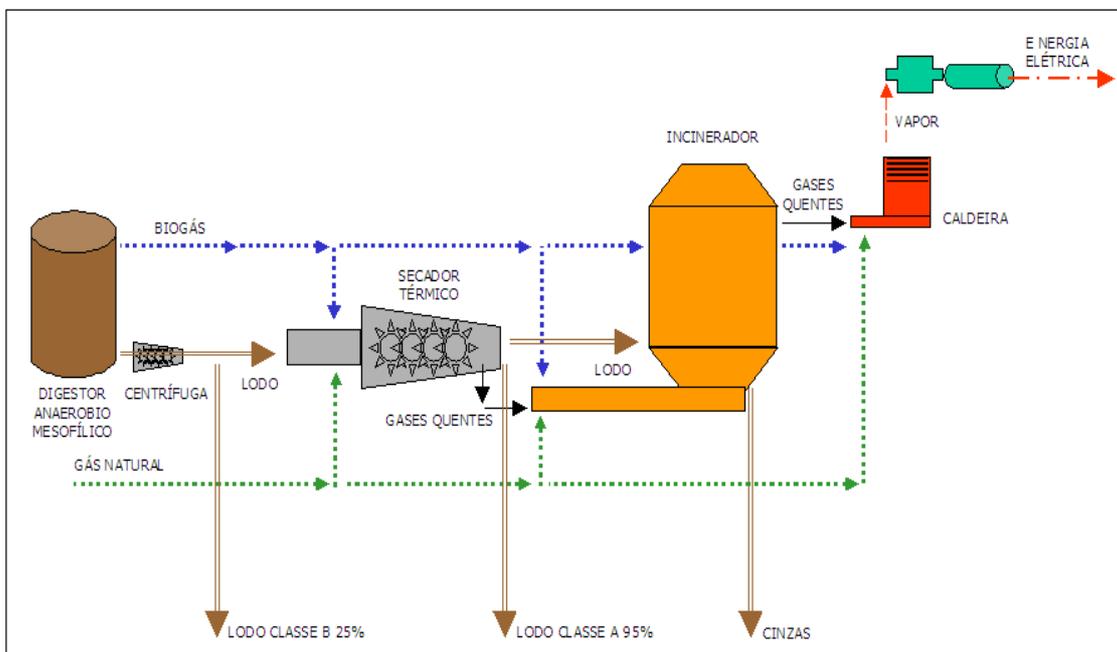


Figura 18: Aproveitamento do biogás somente como combustível para a secagem térmica e a incineração, complementar ao gás natural

Fonte: Volschan Jr., 2009

6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A geração de energia elétrica por meio de motores de combustão interna, turbinas ou células combustíveis pode ocorrer em função da utilização direta do biogás produzido pela digestão anaeróbia ou do vapor produzido em unidades de aproveitamento de energia térmica, subsequentes à incineração (caldeiras). O biogás pode também ser utilizado diretamente como fonte de energia mecânica de compressores de ar e de conjuntos motor-bomba.

a) Motores de combustão interna

Finalidade

Aproveitar o biogás produzido pela digestão anaeróbia ou o vapor produzido em caldeiras complementares à incineração para a geração de energia elétrica.

Mecanismo e descrição do funcionamento

A energia elétrica é produzida por meio de motores de combustão interna acoplados a geradores de eletricidade. O calor emitido pelo conjunto motor-gerador pode ser aproveitado como fonte de energia para o próprio conjunto.

Aspectos técnicos

O aproveitamento do biogás depende do seu tratamento prévio para a remoção de umidade, gás sulfídrico e siloxanos.

A quantidade de energia térmica recuperada como fonte de combustível para a geração de eletricidade é da ordem de 45 a 50%, sendo a produtividade de conversão do combustível da ordem de 30 a 35%.

b) Turbinas

Finalidade

Aproveitar o biogás produzido pela digestão anaeróbia ou o vapor produzido em caldeiras complementares à incineração para a geração de energia elétrica.

Mecanismo e descrição do funcionamento

A energia elétrica é produzida por meio de turbinas acopladas a geradores de eletricidade (turbogerador). A veiculação do biogás (energia térmica) através da turbina proporciona o acionamento e a rotação de lâminas (energia mecânica) da turbina, as quais, por sua vez, acionam o gerador elétrico.

Aspectos técnicos

O aproveitamento do biogás depende do seu tratamento prévio para a remoção de umidade e siloxanos.

Microturbinas geram energia elétrica segundo frequência variável (50 a 60 Hz) e eficiência da ordem de 25 a 30% (para capacidade de 30 kW), podendo a mesma ser elevada para até 70 a 90% por meio da recuperação de calor e do uso da própria energia gerada.

c) Células combustíveis

Finalidade

Aproveitar o biogás produzido pela digestão anaeróbia ou o vapor produzido em caldeiras complementares à incineração para a geração de energia elétrica.

Mecanismo e descrição do funcionamento

Em geral, células combustíveis produzem energia elétrica através de uma reação eletroquímica baseada no uso de hidrogênio presente no biogás e o oxigênio do ar atmosférico. Na célula combustível, o biogás é combinado com a água, sendo o anodo alimentado por hidrogênio, e o catodo por ar. A eletricidade é gerada a partir da eletrólise decorrente da movimentação do hidrogênio entre o anodo e o catodo.

Aspectos técnicos

Células combustíveis apresentam, ainda, maiores restrições em relação à composição do biogás e dependem do seu tratamento prévio para a remoção de gás sulfídrico (<4 ppm), halogênios (flúor, cloro e bromo, <4 ppm), olefinas (<0,5%), oxigênio (<0,5%), amônia (<1 ppm), e de umidade.

Células combustíveis diferem-se em função do tipo de eletrólito que empregam e da temperatura em que operam.

7 OS CASOS BRASILEIROS

7.1 ETE BARUERI

7.1.1 APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

Atualmente, a ETE Barueri, pertencente à SABESP, trata uma vazão média de 9,4 m³ /s. Foram implantadas, nessa ETE, duas PCTs – Pequenas Centrais Termoelétricas supridas por biogás, sendo uma voltada para o desenvolvimento da aplicação de nova tecnologia, com o emprego de microturbina de 30 kW, e outra para a produção de 3.000 kW utilizando motores ciclo Otto, com cogeração.

Na ETE Barueri, o processo de tratamento é o de lodos ativados convencional, constituído por duas fases: líquida e sólida. Nas unidades de digestão, os lodos adensados primários e secundários são recalcados para os digestores anaeróbios. No processo de digestão do lodo, realizado por bactérias metanogênicas, ocorre a liberação de gás com predominância do metano, que é utilizado para a homogeneização do lodo no tempo em que ele permanece digerindo. O excesso deste gás é enviado ao gasômetro.

O biogás é aproveitado para gerar energia elétrica e calor, de forma semelhante ao processo esquematizado na Figura 3 (pág. 45).

Além do aproveitamento energético do biogás para geração de energia elétrica e calor, mantendo satisfatória a temperatura nos biodigestores, garantindo, assim, a qualidade do processo, trata-se de solução ambientalmente adequada para a disposição final do biogás.

São as seguintes as características básicas do sistema de digestão do lodo:

- número de digestores: 2 conjuntos de 4 unidades
- diâmetro de cada digestor: 33,0 m
- profundidade junto à parede: 10,0 m
- área unitária: 855,3 m²
- volume unitário: 10.492 m³

O gás gerado nos digestores é parcialmente armazenado no gasômetro. Na área vizinha ao gasômetro, foram instalados queimadores para a queima do gás excedente.

Aproximadamente 30% da energia contida no biogás é convertida em energia elétrica e 60% podem ser introduzidos em sistemas de reaproveitamento, como aquecimento dos digestores. Esses 30% estão diretamente ligados à eficiência das tecnologias de conversão de energia contida no biogás em energia elétrica, por motores ou turbinas. O consumo de biogás na microturbina é da ordem de 480 m³/d, o que representa aproximadamente 2% dos 22.000 m³/d gerados na ETE.

7.1.2 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PCT COM MICROTURBINA A BIOGÁS

- Microturbina de 30 kW
- Separadores de umidade e secador por refrigeração para desumidificação do biogás
- Filtros coalescentes para eliminação de umidade e aerossóis de óleo
- Filtro de carvão ativado para eliminar compostos de enxofre
- Compressor de palhetas para adequar pressão do biogás na alimentação da microturbina
- Transmissores de pressão, temperatura, vazão e umidade para monitoramento e proteção
- Sistema supervisor para monitoramento remoto via rede interna intranet.

7.1.3 PCT COM MOTORES CICLO OTTO

Pela quantidade e qualidade do gás gerado na ETE Barueri, 22.000 m³/d e 64% de metano, pode-se garantir o fornecimento de uma energia de 1.600 MWh/mês, isto é, aproximadamente 20 GWh/ano, o que corresponde a 30% do consumo total da ETE.

Por ocasião da elaboração do projeto, foi especificada uma PCT de 3 MW, com cogeração, e motores ciclo Otto alimentados através do gasômetro. O calor é utilizado para aquecimento do digestor, melhorando a qualidade do processo com maior eficiência na digestão anaeróbia e aumentando a quantidade de biogás gerado, o que eleva o potencial de geração de 2,6 MW para 2,8 MW.

O sistema incorpora um processo de tratamento dos gases de escape para redução de emissão de óxidos de nitrogênio e carbono.

O acionamento do eixo do alternador é feito diretamente pelo motor. O sistema de arrefecimento possui trocador de calor água-água, de forma a aproveitar o calor das camisas dos motores para o aquecimento dos biodigestores, possuindo, também, trocador de calor ar-água dos gases de escape. (Coura, 2003)



Figura 19: Vista aérea da ETE Barueri
Fonte: www.sabesp.com.br

7.2 ETE ALEGRIA

7.2.1 ABRANGÊNCIA DO PROJETO

Um dos projetos mais importantes do PDBG – Programa de Despoluição da Baía de Guanabara, a ETE Alegria atende às seguintes bacias (abrangendo os bairros do Caju, São Cristóvão, Centro, Gamboa, Catumbi e Tijuca, todos na cidade do Rio de Janeiro):

Centro

Mangue

Catumbi

Alegria

Faria Timbó

São Cristóvão.

A área atendida é de aproximadamente 86 km².

A estação foi projetada para tratar, pelo processo de lodos ativados, uma vazão média de até 5.000 l/s. Em 2010, a vazão média de esgoto afluente à ETE foi de 1.900 l/s.

7.2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A ETE possui unidades de tratamento preliminar, primário e secundário e o esgoto tratado é encaminhado ao Canal do Cunha, que deságua na Baía de Guanabara.

O tratamento preliminar é composto por grades mecanizadas para a retenção e remoção de sólidos grosseiros, elevatória de esgoto bruto, grades para sólidos finos e desarenadores.

O biogás é produzido nos digestores, cada um com capacidade volumétrica de 7.400 m³. Para atender à vazão atual, apenas dois dos cinco digestores estão em funcionamento. Nestas unidades, ocorre a digestão anaeróbia do lodo, gerando biogás, água e lodo estabilizado (sem compostos orgânicos voláteis).

7.2.3 JUSTIFICATIVA DO PROJETO CONCEITUAL DA USINA DE BIOGÁS

A escolha do sistema composto pelo processo de filtragem do biogás e dois blocos geradores distintos, foi definida em função de se buscar não só a rota tecnológica de custo mais baixo como, também, a confiabilidade mais alta para se gerar energia a partir do biogás.

O biogás, cuja vazão média medida em 28/07/2008 foi de 210 m³/h, apresentou, nessa data, a seguinte composição:

CH ₄	68%
CO	31%
H ₂ S	acima de 1.000 ppm
Umidade	alta.

O projeto de geração de energia optou por testar geradores a combustão, não levando em conta a alternativa de geração com o uso de turbinas. A utilização de microturbinas exigiria que o gás combustível apresentasse características que implicariam custos mais elevados de implantação, operação e manutenção.

Foram testadas as seguintes rotas tecnológicas:

- para a geração de 150 kW:
a “ottolização” de um bloco diesel, isto é, a transformação de um motor diesel em um motor ciclo Otto, para este poder passar a operar exclusivamente com gás (no caso, o biogás após ser submetido a um processo de eliminação de oxidantes, siloxanos, particulados e água);
- para a geração de 65 kW:
a tecnologia bicomcombustível, com a instalação de um kit bicomcombustível em um bloco diesel convertido para operar, simultaneamente, com biodiesel e biogás purificado.

A operação pelo equipamento bicomcombustível, que usa diesel e gás natural, foi embasada na possibilidade de oferta de biodiesel retirado da espuma, proveniente dos decantadores primários, processada numa planta piloto existente na ETE.

7.2.4 APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

O biogás é aproveitado para a geração de eletricidade, de forma semelhante ao processo esquematizado na Figura 4 (pág. 46).

Foi implantada uma usina de geração de energia elétrica a partir do biogás, com potência instalada de 215 kW, composta por um sistema de filtragem de biogás e um gerador de energia elétrica, preparado para gerar 150 kW, e um outro gerador para 65 kW.

A energia produzida pelo gerador de 65 kW é usada para energizar a iluminação monumental dos digestores. Já a energia produzida pelo gerador de 150 kW é utilizada na subestação da CEDAE, em paralelo com a rede de energia da concessionária Light S.A., para abastecer conjuntos motor-bomba dos digestores, dos adensadores e demais cargas de consumo do sistema de operação da ETE.

7.2.5 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

A fim de que seja possível a utilização do biogás na alimentação dos dois geradores é necessária a purificação do mesmo. Para tanto, foi instalado um conjunto de equipamentos composto por:

- filtros de limalha, com leito de palha de aço oxidado, para a retirada do H₂S
- torres de secagem, que retiram uma fração de umidade e produzem o biogás limpo para o gerador de 150 kW
- soprador
- torres de lavagem, onde são retirados cerca de 30% do CO₂ e o H₂S residual
- compressor, para a pressurização do gás a 10 atmosferas
- secador a ar comprimido por refrigeração, para a retirada de umidade
- regulador de pressão, para atingir 6 atmosferas
- filtro de peneira molecular, para a remoção do restante do CO₂, bem como do nitrogênio e da umidade residual.

O gás resultante do processo de purificação é Gás Natural Renovável – GNR.

7.2.6 DESCRIÇÃO DAS ROTAS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

A usina foi dimensionada para receber 150 m³/h de biogás, sendo:

- 90 m³/h na rota “biogás limpo” (geração de 150 kW), produzindo 89,5 m³/h de biogás limpo (combustível suficiente para a produção de 135 kWh em regime constante)
- 60 m³/h na “rota biodiesel/GNR” (geração de 65 kW), produzindo 16 m³/h de GNR (podendo, com isso, operar em regime constante de 55 kWh).

A sequência de equipamentos, na “rota biogás limpo”, é:

- filtros de limalha
- torre para remoção de umidade
- soprador
- gerador de 150 kW.

Na “rota biodiesel/GNR”, a sequência de equipamentos é:

- filtros de limalha
- torre para remoção de umidade
- soprador
- torres de lavagem
- compressor
- secador
- filtros de peneira molecular
- armazenador de biogás
- gerador de 65 kW.

(INCISA, 2010)



Figura 20: Vista aérea da ETE Alegria
Fonte: www.cedae.com.br

7.3 ETE ARRUDAS

7.3.1 DESCRIÇÃO

A ETE Arrudas pertence à COPASA e é por ela operada e mantida. Localizada no município de Sabará (Minas Gerais), esta ETE, que trata os esgotos através de reatores anaeróbios (UASB) seguidos de pós-tratamento aeróbio, é uma das maiores e mais modernas estações de tratamento de esgoto do país, ocupando uma área de 63,84 ha e projetada para tratar uma vazão média de $2,25 \text{ m}^3/\text{s}$, o que corresponde a uma população atendida de cerca de 1 milhão de habitantes. Está prevista uma futura ampliação da capacidade da ETE para $4,50 \text{ m}^3/\text{s}$.

7.3.2 APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

O biogás é produzido nos digestores anaeróbios. Para o seu aproveitamento, foi implantada uma PCT, com potência instalada de 2,4 MW, que consiste em um conjunto de microturbinas movidas a biogás.

Todo o biogás gerado, que antes da existência da PCT era queimado sem qualquer aproveitamento energético, é coletado e passa por um sistema de condensação para a retirada da umidade. O biogás é mantido sob pressão em um conjunto de gasômetros que alimentam um sistema de tratamento de gás. Este sistema tem como objetivo a remoção das siloxinas.

Atualmente, o biogás é aproveitado para gerar energia elétrica e calor, de forma semelhante ao processo cujo desenho esquemático encontra-se representado na Figura 3 (pág. 45).

7.3.3 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

a) Gasômetros:

O biogás produzido nos digestores anaeróbios é armazenado e pressurizado em gasômetros de dupla membrana, para permitir um constante fornecimento de biogás para o módulo de geração de energia.

As membranas interna e externa do gasômetro são de poliéster, com recobrimento interno e externo de PVC. A união das seções de membranas é feita por costura e soldagem. Além de satisfazer a diversas características normativas, a membrana utilizada é resistente à abrasão, à ação bacteriana e à radiação ultravioleta.

Cada gasômetro possui um soprador de enchimento com proteção antideflagrante. Entre o soprador e o gasômetro existe uma válvula antirretorno, para manter a pressão no gasômetro a um nível constante no caso de falha ou paralisação do soprador.

b) Sistema de tratamento do biogás:

O sistema de tratamento do biogás possui duas unidades de condicionamento. Estas unidades operam de modo paralelo por ocasião do funcionamento normal ou de modo isolado durante a manutenção de uma das unidades, sem que seja necessária a paralisação do sistema de geração de eletricidade.

Este sistema garante as condições necessárias para a queima do biogás no conjunto de microturbinas.

c) Módulos de geração de energia:

A eletricidade é gerada na PCT por três módulos com capacidade nominal de geração equivalente a 800 kW cada. Compõem, cada módulo, quatro microturbinas com capacidade nominal equivalente a 200 kW cada. No total, a capacidade de geração de eletricidade é de 2,4 MW.

Está previsto que os gases quentes de exaustão das microturbinas serão direcionados para trocadores de calor, os quais irão fornecer calor a outros processos na ETE como, por exemplo, para a secagem de lodo. (COPASA, 2008)



Figura 21: Vista aérea da ETE Arrudas
Fonte: www.copasa.com.br

8 ESTUDO HIPOTÉTICO

POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PROVENIENTE DO LODO DE UMA ETE POR LODOS ATIVADOS PARA 100.000 HABITANTES

a) Cálculo da vazão média afluyente à ETE:

$$Q_{\text{méd}} = \frac{C.P.q}{86400} + I + Q_c$$

sendo:

$Q_{\text{méd}}$ = vazão média em l/s

C = coeficiente de retorno (relação esgoto coletado/água fornecida)

P = população beneficiada (ou esgotada)

q = consumo de água *per capita* em l/hab.d

I = vazão de infiltração na rede coletora de esgotos em l/s

Q_c = somatório das vazões concentradas, também denominadas contribuições singulares, em l/s

Valores adotados:

C = 0,8

P = 100.000 hab

q = 300 l/hab.d

Extensão média da rede coletora por habitante esgotado no Brasil: 1,6 m/hab, de acordo com os dados constantes do SNIS-2008 (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento do Ministério das Cidades)

Taxa de infiltração: 0,2 l/s por quilômetro de rede coletora

Logo, a extensão total da rede coletora de esgotos (L) será:

$L = 1,6 \text{ m/hab} \times 100.000 \text{ hab} = 160.000 \text{ m} = 160 \text{ km}$

Portanto, a infiltração na rede (I) será:

$I = 0,2 \text{ l/s.km} \times 160 \text{ km} = 32,0 \text{ l/s}$

Admitindo que, neste caso, as vazões concentradas sejam desprezíveis em relação às outras parcelas do cálculo da vazão média, e tendo em vista os valores anteriormente adotados, tem-se:

$$Q_{\text{méd}} = \frac{0,8 \times 100000 \times 300}{86400} + 32,0 + 0 \cong 310,0 \text{ l/s}$$

b) Volume de biogás gerado:

Produção aproximada de gás: 20 l/hab.d (Jordão, 2011)

$$0,02 \text{ m}^3 \text{ gás/hab.d} \times 100.000 \text{ hab} = 2.000 \text{ m}^3 \text{ gás/d}$$

c) Energia bruta (E) produzida (admitindo que o poder calorífico do biogás seja de 22.400 kJ/m³):

$$E = 2.000 \text{ m}^3 \text{ gás/d} \times 22.400 \text{ kJ/m}^3 = 4,48 \times 10^7 \text{ kJ/d} \cong 12.445 \text{ kWh/d}$$

d) Rendimento global da transformação em energia elétrica: 25%

e) Potencial de eletricidade disponibilizado:

$$\frac{0,25 \times 12.445 \text{ kWh/d}}{24 \text{ h/d}} \cong 130 \text{ kW} \cong 177 \text{ cv} \cong 174 \text{ HP}$$

f) Cálculo da potência requerida na aeração por ar difuso:

f.1) Carga de DBO afluente à ETE:

Contribuição unitária da DBO: 54 gDBO/hab.d (Jordão, 2011)

$$54 \text{ gDBO/hab.d} \times 100000 \text{ hab} \times 10^{-3} \text{ kg/g} = 5400 \text{ kgDBO/d}$$

f.2) Carga de DBO afluente ao tanque de aeração (admitindo uma redução de 30% no tratamento primário):

$$0,7 \times 5400 \text{ kgDBO/d} = 3780 \text{ kgDBO/d}$$

f.3) Massa teórica de oxigênio requerida (MO₂), admitindo 1,5 kg de O₂ por kg de DBO aplicada:

$$MO_2 = 1,5 \text{ kgO}_2/\text{kgDBO} \times 3780 \text{ kgDBO/d} = 5670 \text{ kgO}_2/\text{d}$$

f.4) Massa real de oxigênio a introduzir desde os compressores (M), considerando que a eficiência de transferência de oxigênio do equipamento é de 15% e que a capacidade de oxigenação no esgoto é de 65% da que seria em água limpa:

$$M = (5670 \text{ kgO}_2/\text{d}) / (0,15 \times 0,65) \cong 58154 \text{ kgO}_2/\text{d}$$

f.5) Massa de ar a introduzir desde os compressores (M_{ar}), admitindo um teor de oxigênio no ar de 23,2%:

$$M_{\text{ar}} = (58154 \text{ kgO}_2/\text{d}) / (0,232 \text{ kgO}_2/\text{kg ar}) \cong 250664 \text{ kg ar/d}$$

f.6) Vazão de ar a introduzir desde os compressores (Q_{ar}), levando em conta a massa específica do ar de 1,20 kg/m³:

$$Q_{\text{ar}} = (250664 \text{ kg ar/d}) / (1,20 \text{ kg/m}^3) \cong 208887 \text{ m}^3/\text{d} \cong 145 \text{ m}^3/\text{min}$$

f.7) Potência dos compressores (P_c):

$$P_c = \frac{M_{\text{ar}} \cdot R \cdot T_0}{8,41 \cdot E} \left[\left(\frac{p_s}{p_e} \right)^{0,283} - 1 \right] \quad (\text{Jordão, 2011})$$

onde:

P_c = potência do(s) compressor(es), kW

M_{ar} = massa de ar, kg/s

$$M_{\text{ar}} = 1,20 \text{ kg/m}^3 \times Q_{\text{ar}} (\text{m}^3/\text{min}) \times 1 \text{ min}/60\text{s} = 1,20 \times 145 / 60 = 2,9 \text{ kg/s}$$

R = constante do gás = 8,314 kJ/kmol^oK

T_0 = temperatura absoluta de entrada, ^oK = ^oC + 273

admitindo uma temperatura ambiente máxima de 30^oC, tem-se: $T_0 = 30^{\circ}\text{C} + 273 = 303^{\circ}\text{K}$

8,41 = constante do ar, kg/kmol

E = eficiência do compressor, 0,70 a 0,80 (valor adotado: E = 0,75)

p_s = pressão absoluta de saída, no compressor, atm

considerando uma profundidade de água a vencer (H) de 4,50 m e perdas (nas tubulações, no difusor e no compressor) de aproximadamente 1,2 a 1,4 vezes H:

$$1,3 \times 4,50 = 5,85 \text{ m.c.a.} = (5,85/10,33) \text{ atm} = 0,57 \text{ atm}$$

$$p_s = 0,57 + 1 = 1,57 \text{ atm}$$

p_e = pressão absoluta de entrada, no compressor, atm ($p_e = 1 \text{ atm}$)

logo:

$$P_c = \frac{2,9 \times 8,314 \times 303}{8,41 \times 0,75} \times \left[\left(\frac{1,57}{1} \right)^{0,283} - 1 \right] \cong 158 \text{ kW}$$

g) Cálculo da potência requerida na aeração superficial:

g.1) Capacidade de oxigenação (C.O.):

C.O. do aerador superficial em água limpa $\cong 1,5 \text{ kgO}_2/\text{kWh}$

C.O. do aerador superficial no esgoto $\cong 0,65 \times 1,5 \cong 1,0 \text{ kgO}_2/\text{kWh}$

g.2) Potência dos aeradores (P_a):

$$P_a = \frac{MO_2}{C.O.}$$

$$MO_2 = 5670 \text{ kgO}_2/\text{d} = 5670 \text{ kgO}_2/24\text{h} \cong 236 \text{ kgO}_2/\text{h}$$

$$P_a = \frac{236 \text{ kgO}_2 / \text{h}}{1,0 \text{ kgO}_2 / \text{kWh}} = 236 \text{ kW}$$

Observação:

No item “e”, verifica-se que o potencial de eletricidade disponibilizado, com o aproveitamento do biogás, é de 130 kW. Portanto, no presente estudo, se a energia elétrica gerada pelo biogás fosse utilizada para o acionamento de compressores, na aeração por ar difuso, ou de aeradores superficiais, teria que haver uma complementação através de outra fonte de energia, tendo em vista que os valores de P_c (158 kW) e de P_a (236 kW) são superiores a 130 kW.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário brasileiros consomem, de acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), cerca de 3% do consumo total de energia do país.

Incentivos ao aproveitamento e/ou à geração de energia nas próprias ETEs significam menor potencial de emissão de gases do efeito estufa devidos à matriz energética nacional e conferem, além do benefício econômico, sustentabilidade ambiental às empresas de saneamento.

As tecnologias de digestão anaeróbia e de aproveitamento de biogás têm-se revelado eficazes no tratamento e valorização de resíduos e na mitigação do efeito estufa, com aceitáveis custos de operação, possibilitando, ainda, a produção de energia elétrica, evitando custos ambientais correspondentes às fontes convencionais.

Diversos países buscam alternativas para reduzir a dependência de combustíveis fósseis para a geração de energia, tendo em vista não só a necessidade cada vez maior de diminuir a emissão de gases do efeito estufa como também as constantes altas do preço do petróleo. Neste cenário, o papel do biogás é e será fundamental.

No Brasil, os equipamentos são, em sua maioria, importados, o que ocorre não por desconhecimento tecnológico, mas porque a escala de produção atual não permite a viabilidade econômica destes fabricantes no país. Porém, o emprego de técnicas de aproveitamento do biogás proveniente do lodo de esgoto em estações de tratamento de grande porte, nos estados de São Paulo (ETE Barueri), do Rio de Janeiro (ETE Alegria) e de Minas Gerais (ETE Arrudas), tem demonstrado a confiança de empresas de saneamento (SABESP, CEDAE e COPASA) neste procedimento por tratar-se de tecnologia factível que pode ser implementada.

Recomenda-se, para que o objetivo específico deste trabalho seja ampliado, que o mesmo venha a ter continuidade de modo a contemplar, além dos aspectos técnicos enfocados, uma abordagem específica sobre custos e de acordo com outros pontos de vista como o socioambiental, o normativo e o institucional. É também recomendável que, em

complementação a essa abordagem, sejam feitos estudos visando à sustentabilidade das ETEs, tendo em vista a importância da Sustentabilidade Ambiental na preservação dos recursos naturais e dos ecossistemas. Poderá constar desses estudos uma análise da possibilidade da utilização conjunta do lixo úmido com o lodo de esgotos na produção de biogás e composto orgânico, onde os resíduos, ao invés de poluírem e degradarem o meio ambiente, se transformarão em energia e composto orgânico.

Recomenda-se, ainda, que as políticas públicas que privilegiam o uso de energia que, para ser gerada, acarreta grandes passivos ambientais, sejam redefinidas privilegiando as fontes limpas como, por exemplo, a energia produzida através do aproveitamento do biogás proveniente do lodo de esgoto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

BEN – Balanço Energético Nacional 2009 – Ano Base 2008. Elaborado pelo MME – Ministério de Minas e Energia e pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Brasil, 2009.

BOLETIM ENFOQUE. Biodigestor “PE”, fonte alternativa energética e de biofertilizantes – Edição 03, Recife, 1999.

BRITTO, Evandro Rodrigues de. Tecnologias adequadas ao tratamento de esgotos. Rio de Janeiro: ABES, 2004.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa (2000a). Medidas mitigadoras para a redução de emissão de gases de efeito estufa na geração termelétrica. Dupligráfica Editora. Brasília, 2000.

_____2003b. Projeto instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto. Relatório de atividades. São Paulo, 2003.

_____2003c. Projeto programa de uso racional de energia e fontes alternativas – PUREFA. Relatório de acompanhamento. São Paulo, 2003.

_____2003d. Fluxograma do processo de instalação dos equipamentos do projeto PUREFA. Relatório de acompanhamento. São Paulo, 2003.

_____2004e. Projeto instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto. Relatório de atividades. São Paulo, 2004.

_____2004f. Projeto instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto. Relatório técnico final. São Paulo, 2004.

_____2004g. Projeto programa de uso racional de energia e fontes alternativas – PUREFA. Relatório de acompanhamento. São Paulo, 2004.

_____. 2005h. Projeto programa de uso racional de energia e fontes alternativas – PUREFA. Relatório de acompanhamento. São Paulo, 2005.

_____. 2006i. Projeto instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto. Relatório final de atividades. São Paulo, 2006.

CHAMBERS, A. K.; POTTER, I. Gas utilization from sewage waste. AIDIS-Canada, Environmental Project, 2002.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

_____, et al. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte: PROSAB, 2001.

CLASSEN, P. A. M.; LIER, J. B.; STAMRS, A. J. M. Utilization of biomass for supply of energy carrier. Applied microbiology and biotechnology, 1999

COELHO, Suani Teixeira, et al. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. Trabalho apresentado no XI Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro, 2006.

COPASA. Companhia de Saneamento de Minas Gerais. Relatório de sustentabilidade. Belo Horizonte, 2008.

COURA, Sebastião de Paula. Geração de energia elétrica utilizando o biogás produzido no tratamento de esgoto. Revista Saneas, São Paulo, edição 15, p. 32-37, jun. 2003.

COSTA, David Freire da. Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. 194 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, USP, São Paulo, 2006.

DAVID, Airton Checoni. Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2002.

EPA. Case studies in residual use and energy conservation at wastewater treatment plants. Washington, 2001.

ICLEI – Brasil – Governos Locais pela Sustentabilidade. Manual para aproveitamento do biogás. São Paulo, 2009.

INCISA Bioenergia. Projeto de aproveitamento do biogás da ETE Alegria. Rio de Janeiro, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewable energy. Head of Publications Service. Paris, 2006.

JOHANSSON, T. B., et al. Renewable energy sources for fuels and electricity. Island Press. Washington, 1993.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. Tratamento de Esgotos Domésticos. 6. ed. (no prelo). Rio de Janeiro: ABES, 2011.

KAHLMAYER-MERTENS, Roberto S., et al. Como elaborar projetos de pesquisa: linguagem e método. Rio de Janeiro: FGV, 2007.

METCALF & Eddy. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4. ed. McGraw Hill Publishing Co. Nova York, 2003.

PECORA, Vanessa. 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 em Energia) – PIPGE, USP, São Paulo, 2006.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbico de esgotos: um manual para regiões de clima quente. Eptgraf. Campina Grande, 1994.

VOLSCHAN JR., Isaac. Tecnologias de tratamento de lodo. Notas de aula. Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2005.

WERECO-BROBBY, C. Y.; HAGEN, E. B. Biomass conversion and technology. Editora John Wiley & Sons. Nova York, 2000.

SITES NA INTERNET

<http://brasil.cat.com/>

<http://cenbio.iee.usp.br/>

<http://mysolar.cat.com>

<http://www.ambientebrasil.com.br/>

<http://www.aneel.com.br/>

<http://www.capstoneturbine.com/>

<http://www.cedae.com.br/>

<http://www.cooperindustries.com/>

<http://www.copasa.com.br/>

<http://www.coppe.ufrj.br/>

http://www.enge.com.br/esgoto_tecnologia.htm

<http://www.epa.gov/>

<http://www.mct.gov.br/>

<http://www.microturbine.com/>

<http://www.mma.gov.br/>

<http://www.mme.gov.br/>

<http://www.pieralisi.com.br/>

<http://www.sabesp.com.br/>

<http://www.snis.gov.br/>

<http://www.ufmg.br/>

<http://www.ufpb.br/>

<http://www.usp.br/>

<http://www.waukeshaengine.com/>

<http://www.wef.org/>

APÊNDICE

**FABRICANTES DE EQUIPAMENTOS PARA GERAÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS**

APÊNDICE

FABRICANTES DE EQUIPAMENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS

A seguir, então relacionados alguns fabricantes de equipamentos utilizados na geração de energia elétrica através do biogás de tratamento de esgoto, com os seus respectivos sites na internet:

Capstone: www.capstoneturbine.com/

Caterpillar: www.cat.com/

Cooper: www.cooperindustries.com/

H. Cegielski: www.hcp.com.pl/

Ingersoll-Rand: www.ingersollrandproducts.com/

Jenbacher: www.jenbacher.com/

Pieralisi: www.pieralisi.com.br/

Stamford: www.cumminsgeneratortechnologies.com/en/

Waukesha: www.kraftpower.com/waukesha/waukesha_generators.html

ANEXO A

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 375/2006

RESOLUÇÃO CONAMA n^o 375 , de 29 de agosto de 2006 Publicada no DOU n^o 167, de 30 de agosto de 2006, Seção 1, páginas 141-146

Correlações:

Anexo I retificado pela Resolução CONAMA n^o 380/06

Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, no uso das competências que lhe são conferidas pelos arts. 6^o, inciso II e 8^o, inciso VII, da Lei n^o 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto n^o 99.274, de 6 de junho de 1990 e suas alterações, tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, e

Considerando que a produção de lodos de esgoto é uma característica intrínseca dos processos de tratamento de esgotos e tende a um crescimento no mínimo proporcional ao crescimento da população humana e a solução para sua disposição é medida que se impõe com urgência;

Considerando que os lodos de esgoto correspondem a uma fonte potencial de riscos à saúde pública e ao ambiente e potencializam a proliferação de vetores de moléstias e organismos nocivos;

Considerando que devido a fatores naturais e acidentais os lodos de esgotos são resíduos que podem conter metais pesados, compostos orgânicos persistentes e patógenos em concentrações nocivas à saúde e ao meio ambiente;

Considerando a necessidade de dispor os lodos de esgoto provenientes das estações de tratamento de esgoto sanitário de forma adequada à proteção do meio ambiente e da saúde da população;

Considerando que o lodo de esgoto sanitário constitui fonte de matéria orgânica e de nutrientes para as plantas e que sua aplicação no solo pode trazer benefícios à agricultura;

Considerando que o lodo de esgoto é um resíduo que pode conter elementos químicos e patógenos danosos à saúde e ao meio ambiente;

Considerando que o uso agrícola do lodo de esgoto é uma alternativa que apresenta vantagens ambientais quando comparado a outras práticas de destinação final; e

Considerando que a aplicação do lodo de esgoto na agricultura se enquadra nos princípios de reutilização de resíduos de forma ambientalmente adequada, resolve:

SEÇÃO I

Das Disposições Preliminares

Art. 1^o Esta Resolução estabelece critérios e procedimentos para o uso, em áreas agrícolas, de lodo de esgoto gerado em estação de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, visando benefícios à agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao ambiente.

Parágrafo único. Para a produção, compra, venda, cessão, empréstimo ou permuta do lodo de esgoto e seus produtos derivados, além do previsto nesta Resolução, deverá ser observado o disposto no Decreto n^o 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que regulamenta a Lei n^o 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura.

Art. 2^o Para efeito desta Resolução, são adotadas as seguintes definições:

I - agentes patogênicos: bactérias, protozoários, fungos, vírus, helmintos, capazes de provocar doenças ao hospedeiro;

II - aplicação no solo: ação de aplicar o lodo de esgoto sanitário ou produto derivado uniformemente:

- a) sobre a superfície do terreno (seguida ou não de incorporação);
- b) em sulcos;
- c) em covas;
- d) por injeção subsuperficial;

III - áreas agrícolas: áreas destinadas à produção agrícola e silvicultura;

IV - áreas de aplicação do lodo de esgoto: áreas agrícolas em que o lodo de esgoto ou produto derivado é aplicado;

V - atratividade de vetores: característica do lodo de esgoto ou produto derivado, não tratado ou tratado inadequadamente, de atrair roedores, insetos ou outros vetores de agentes patogênicos;

- VI - carga acumulada teórica de uma substância inorgânica:
 a) somatório das cargas aplicadas;
 b) somatório (taxa de aplicação X concentração da substância inorgânica no lodo de esgoto ou produto derivado aplicado);
- VII - concentração de microrganismos: número de microrganismos presentes no lodo de esgoto ou produto derivado por unidade de massa dos sólidos totais (base seca);
- VIII - esgoto sanitário: despejo líquido constituído de esgotos predominantemente domésticos, água de infiltração e contribuição pluvial parasitária;
- IX - estabilização: processo que leva os lodos de esgoto destinados para o uso agrícola a não apresentarem potencial de geração de odores e de atratividade de vetores, mesmo quando reumidificados;
- X - Estação de Tratamento de Esgotos - ETE: estrutura de propriedade pública ou privada utilizada para o tratamento de esgoto sanitário;
- XI - fração de mineralização do nitrogênio do lodo de esgoto ou produto derivado: fração do nitrogênio total nos lodos de esgoto ou produto derivado, que, por meio do processo de mineralização, será transformada em nitrogênio inorgânico disponível para as plantas; XII - lodo de esgoto: resíduo gerado nos processos de tratamento de esgoto sanitário;
- XIII - lodo de esgoto ou produto derivado estabilizado: lodo de esgoto ou produto derivado que não apresenta potencial de geração de odores e atração de vetores de acordo com os níveis estabelecidos nesta norma;
- XIV - lodo de esgoto ou produto derivado higienizado: lodo de esgoto ou produto derivado submetido a processo de tratamento de redução de patógenos, de acordo com os níveis estabelecidos nesta norma;
- XV - lote de lodo de esgoto ou produto derivado: quantidade de lodo de esgoto ou produto derivado destinado para uso agrícola, gerada por uma Estação de Tratamento de Esgoto - ETE ou Unidade de Gerenciamento de Lodo - UGL no período compreendido entre duas amostragens subsequentes, caracterizada físico-química e microbiologicamente;
- XVI - manipulador: pessoa física ou jurídica que se dedique à atividade de aplicação, manipulação ou armazenagem de lodo de esgoto ou produto derivado;
- XVII - parcela: área homogênea, definida para fins de monitoramento, com base nos critérios definidos no Anexo IV desta Resolução;
- XVIII - produto derivado: produto destinado a uso agrícola que contenha lodo de esgoto em sua composição;
- XIX - projeto agrônômico: projeto elaborado por profissional habilitado visando a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado em determinada área agrícola, observando os critérios e procedimentos estabelecidos nesta Resolução;
- XX - taxa de aplicação: quantidade de lodo de esgoto ou produto derivado aplicada em toneladas (base seca) por hectare, calculada com base nos critérios definidos nesta Resolução;
- XXI - transportador de lodo de esgoto: pessoa física ou jurídica que se dedique à movimentação de lodo de esgoto ou produto derivado da ETE à UGL e desta às áreas de aplicação agrícola, mediante veículo apropriado ou tubulação; e
- XXII - Unidade de Gerenciamento de Lodo - UGL: unidade responsável pelo recebimento, processamento, caracterização, transporte, destinação do lodo de esgoto produzido por uma ou mais estações de tratamento de esgoto sanitário e monitoramento dos efeitos ambientais, agrônômicos e sanitários de sua aplicação em área agrícola.

Art 3º Os lodos gerados em sistemas de tratamento de esgoto, para terem aplicação agrícola, deverão ser submetidos a processo de redução de patógenos e da atratividade de vetores, de acordo com o Anexo I desta Resolução.

§ 1º Esta Resolução não se aplica a lodo de estação de tratamento de efluentes de processos industriais.

§ 2º Esta Resolução veta a utilização agrícola de:

- I - lodo de estação de tratamento de efluentes de instalações hospitalares; II - lodo de estação de tratamento de efluentes de portos e aeroportos;
 III - resíduos de gradeamento; IV - resíduos de desarenador;
 V - material lipídico sobrenadante de decantadores primários, das caixas de gordura e dos reatores anaeróbicos;
 VI - lodos provenientes de sistema de tratamento individual, coletados por veículos, antes de seu tratamento por uma estação de tratamento de esgoto;
 VII - lodo de esgoto não estabilizado; e
 VIII - lodos classificados como perigosos de acordo com as normas brasileiras vigentes.

Art. 4º Os lotes de lodo de esgoto e de produtos derivados, para o uso agrícola, devem respeitar os limites

estabelecidos no art. 11, Tabelas 2 e 3, desta Resolução.

Parágrafo único. Não poderão ser misturados lodos de esgoto que não atendam as características definidas no art. 11, Tabelas 2 e 3, desta Resolução.

Art. 5º Para o uso de lodo de esgoto como componente de produtos derivados destinados para uso agrícola, o lote deverá atender aos limites para as substâncias potencialmente tóxicas, definidos no art. 11, Tabela 2, desta Resolução.

Art. 6º É proibida a importação de lodo de esgoto ou produto derivado.

Art. 7º A caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado a ser aplicado deve incluir os seguintes aspectos:

I - potencial agrônômico;

II - substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas; III - indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos; e

IV - estabilidade.

§ 1º Para a caracterização do potencial agrônômico do lodo de esgoto ou produto derivado, deverão ser determinados, de acordo com os Anexos II, III e IV desta Resolução, os seguintes parâmetros:

I - carbono orgânico; II - fósforo total;

III - nitrogênio Kjeldahl; IV - nitrogênio amoniacal;

V - nitrogênio nitrato/nitrito; VI - pH em água (1:10);

VII - potássio total; VIII - sódio total;

IX - enxofre total;

X - cálcio total;

XI - magnésio total; XII - umidade; e

XIII - sólidos voláteis e totais.

§ 2º Para a caracterização química do lodo de esgoto ou produto derivado quanto à presença de substâncias inorgânicas, deverão ser determinadas, de acordo com os Anexos II e IV desta Resolução, as seguintes substâncias:

I - Arsênio;

II - Bário; III - Cádmio;

IV - Chumbo; V - Cobre;

VI - Cromo; VII - Mercúrio;

VIII - Molibdênio; IX - Níquel;

X - Selênio; e XI - Zinco.

§ 3º Para a caracterização química do lodo de esgoto ou produto derivado quanto à presença de substâncias orgânicas, deverão ser determinadas, de acordo com os Anexos II e IV desta Resolução, as substâncias indicadas na Tabela 1 do Anexo V desta Resolução, inclusive quantitativamente.

§ 4º Em função das características específicas da bacia de esgotamento sanitário e dos efluentes recebidos, as UGLs poderão requerer, junto ao órgão ambiental competente, dispensa ou alteração da lista de substâncias orgânicas a serem analisadas nos lotes de lodo de esgoto ou produto derivado.

§ 5º Para a caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado quanto à presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos, deverão ser determinadas, de acordo com os Anexos II e IV desta Resolução, as concentrações de:

I - coliformes termotolerantes; II - ovos viáveis de

helmintos; III - *Salmonella*; e

IV - vírus entéricos.

§ 6º Para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,70.

Art. 8º O órgão ambiental competente poderá solicitar, mediante motivação, outros ensaios e análises não listados nesta Resolução.

Parágrafo único. Em função das características específicas da bacia de esgotamento sanitário e dos efluentes recebidos, as UGLs poderão requerer, junto ao órgão ambiental competente, dispensa ou alteração da lista de substâncias a serem analisadas nos lotes de lodo de esgoto ou produto derivado.

Art. 9º A aplicação de lodo de esgoto e produtos derivados no solo agrícola somente poderá ocorrer mediante a existência de uma UGL devidamente licenciada pelo órgão ambiental competente.

§ 1º O licenciamento ambiental da UGL deve obedecer aos mesmos procedimentos adotados para as atividades

potencialmente poluidoras e/ou modificadoras do meio ambiente, exigidos pelos órgãos ambientais competentes.

§ 2º O licenciamento ambiental da UGL contemplará obrigatoriamente as áreas de aplicação.

§ 3º O processo de licenciamento deve prever mecanismos de prestação de informações à população da localidade em que será utilizado o lodo de esgoto ou produto derivado sobre:

- I - os benefícios;
- II - riscos;
- II - tipo e classe de lodo de esgoto ou produto derivado empregado;
- IV - critérios de aplicação;
- V - procedimentos para evitar a contaminação do meio ambiente e do homem por organismos patogênicos; e
- IV - o controle de proliferação de animais vetores.

SEÇÃO II

Da Frequência de Monitoramento do Lodo de Esgoto ou Produto Derivado

Art. 10. O monitoramento das características do lodo de esgoto ou produto derivado deverá ser implementado de acordo com os critérios de frequência definidos na Tabela 1.

Tabela 1. Frequência de monitoramento

Quantidade de lodo de esgoto ou produto derivado destinado para aplicação na agricultura em toneladas/ano (base seca)	Frequência de monitoramento
até 60	anual, preferencialmente anterior ao período de maior demanda pelo lodo de esgoto ou produto derivado
de 60 a 240	semestral, preferencialmente anterior aos períodos de maior demanda pelo lodo de esgoto ou produto derivado
de 240 a 1.500	trimestral
de 1.500 a 15.000	bimestral
acima de 15.000	mensal

§ 1º A caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado, representada por amostragem, é válida exclusivamente para o lote gerado no período compreendido entre esta amostragem e a subsequente.

§ 2º Caso os valores para substâncias potencialmente tóxicas alcancem 80% dos limites estabelecidos por esta Resolução, a frequência de monitoramento deverá ser aumentada, segundo parâmetros definidos pelo órgão ambiental competente, e a UGL deverá implementar as medidas adequadas para reduzir estes valores.

§ 3º A critério do órgão ambiental licenciador, em conjunto com os órgãos de saúde e de agricultura competentes, as frequências de amostragem podem ser aumentadas, devidamente justificadas.

§ 4º As análises químicas e biológicas previstas nesta Resolução devem ser realizadas em laboratórios que adotem os procedimentos de controle de qualidade analítica necessários ao atendimento das condições exigíveis.

§ 5º Os lotes de lodo de esgoto ou produto derivado, para uso agrícola que não se enquadrarem nos limites e critérios definidos nesta Resolução deverão receber outra forma de destinação final, devidamente detalhada no processo de licenciamento ambiental e aprovada pelo órgão ambiental licenciador.

SEÇÃO III

Requisitos Mínimos de Qualidade do Lodo de Esgoto ou Produto Derivado Destinado à Agricultura

Art. 11. Os lotes de lodo de esgoto e de produtos derivados, para o uso agrícola, devem respeitar os limites máximos de concentração das Tabelas 2 e 3, a seguir especificadas:

Tabela 2. Lodos de esgoto ou produto derivado - substâncias inorgânicas

Substâncias inorgânicas	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromo	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Tabela 3. Classes de lodo de esgoto ou produto derivado - agentes patogênicos

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes $<10^3$ NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos $< 0,25$ ovo / g de ST <i>Salmonella</i> ausência em 10 g de ST Vírus $< 0,25$ UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes $<10^6$ NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

ST: Sólidos Totais

NMP: Número Mais Provável

UFF: Unidade Formadora de Foco

UFP: Unidade Formadora de Placa

§ 1º Decorridos 5 anos a partir da data de publicação desta Resolução, somente será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado Classe A, exceto sejam propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais, que demonstrem a segurança do uso do lodo de esgoto Classe B.

§ 2º As UGLs terão, após a data de publicação desta Resolução, 18 meses para se adequarem a esta Resolução.

SEÇÃO IV

Das Culturas Aptas a Receberem Lodo de Esgoto ou Produto Derivado

Art 12. É proibida a utilização de qualquer classe de lodo de esgoto ou produto derivado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos, raízes e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo.

§ 1º Em solos onde for aplicado lodo de esgoto ou produto derivado, as pastagens poderão ser implantadas após um período mínimo de 24 meses da última aplicação.

§ 2º Em solos onde for aplicado lodo de esgoto ou produto derivado, somente poderão ser cultivadas olerícolas, tubérculos, raízes e demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo, bem como cultivos inundáveis, após um período mínimo de 48 meses da última aplicação.

Art. 13. Lodos de esgoto ou produto derivado enquadrados como Classe A poderão ser utilizados para quaisquer culturas, respeitadas as restrições previstas nos arts. 12 e 15 desta Resolução.

Art. 14. A utilização de lodo de esgoto ou produto derivado enquadrado como Classe B é restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação, respeitadas as restrições previstas no art. 15 e no inciso XI, do art. 18 desta Resolução.

SEÇÃO V

Das Restrições Locacionais e da Aptidão do Solo das Áreas de Aplicação

Art. 15. Não será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado:

- I - em unidades de conservação, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental - APA;
- II - em Área de Preservação Permanente - APP;
- III - em Áreas de Proteção aos Mananciais - APMs definidas por legislações estaduais e municipais e em outras áreas de captação de água para abastecimento público, a critério do órgão ambiental competente;
- IV - no interior da Zona de Transporte para fontes de águas minerais, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis de mesa, definidos na Portaria DNPM n^o 231, de 1998;
- V - num raio mínimo de 100 m de poços rasos e residências, podendo este limite ser ampliado para garantir que não ocorram incômodos à vizinhança;
- VI - numa distância mínima de 15 (quinze) metros de vias de domínio público e drenos interceptadores e divisores de águas superficiais de jusante e de trincheiras drenantes de águas subterrâneas e superficiais;
- VII - em área agrícola cuja declividade das parcelas ultrapasse:
 - a) 10% no caso de aplicação superficial sem incorporação;
 - b) 15% no caso de aplicação superficial com incorporação;
 - c) 18% no caso de aplicação subsuperficial e em sulcos, e no caso de aplicação superficial sem incorporação em áreas para produção florestal;
 - d) 25% no caso de aplicação em covas;
- VIII - em parcelas com solos com menos de 50 cm de espessura até o horizonte C; IX - em áreas onde a profundidade do nível do aquífero freático seja inferior a 1,5 m na cota mais baixa do terreno; e
- X - em áreas agrícolas definidas como não adequadas por decisão motivada dos órgãos ambientais e de agricultura competentes.

§ 1^o O lodo de esgoto ou produto derivado poderão ser utilizados na zona de amortecimento de unidades de conservação, desde que sejam respeitados as restrições e os cuidados de aplicação previstas nesta Resolução, bem como restrições previstas no plano de manejo, mediante prévia autorização do órgão responsável pela administração da unidade de conservação.

§ 2^o No caso da identificação de qualquer efeito adverso decorrente da aplicação de lodos de esgoto ou produto derivado realizada em conformidade com esta Resolução, e com vistas a proteger a saúde humana e o ambiente, as autoridades competentes deverão estabelecer, imediatamente após a mencionada identificação, requisitos complementares aos padrões e critérios insertos nesta Resolução.

SEÇÃO VI

Do Projeto Agronômico e das Condições de Uso

Art. 16. Toda aplicação de lodo de esgoto e produtos derivados em solos agrícolas deve ser obrigatoriamente condicionada à elaboração de um projeto agronômico para as áreas de aplicação, conforme roteiro constante do Anexo VIII desta Resolução, firmado por profissional devidamente habilitado, que atenda aos critérios e procedimentos ora estabelecidos.

Parágrafo único. A UGL deverá encaminhar ao proprietário e ao arrendatário ou administrador da área, declaração baseada no modelo constante do Anexo VI desta Resolução, contendo informações sobre as características do lodo de esgoto ou produto derivado, em especial quanto ao tratamento adotado para redução de patógenos e vetores, e orientações quanto à aplicação, baseadas no projeto agronômico, para aprovação e consentimento dos mesmos.

SEÇÃO VII

Da Aplicação

Art 17. Deverá ser adotado, para a taxa de aplicação máxima em base seca, o menor valor calculado de acordo com os seguintes critérios:

- I - a aplicação máxima anual de lodo de esgoto e produtos derivados em toneladas por hectare não deverá exceder o quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura (em kg/ha), segundo a recomendação agronômica oficial do estado, e o teor de nitrogênio disponível no lodo de esgoto ou produto derivado (N_{disp} em kg/t), calculado de acordo com o Anexo III desta Resolução;

$$\text{Taxa de aplicação (t/ha)} = \frac{\text{N recomendado (kg/ha)}}{\text{Ndisp (kg/t)}}$$

II - o cálculo da taxa de aplicação máxima anual deverá levar em conta os resultados dos ensaios de elevação de pH provocado pelo lodo de esgoto ou produto derivado constantes do Anexo II desta Resolução, no solo predominante na região de modo a garantir que o pH final da mistura solo-lodo de esgoto ou produto derivado não ultrapasse o limite de 7,0; e III - observância dos limites de carga total acumulada teórica no solo quanto à aplicação de substâncias inorgânicas, considerando a Tabela 4, a seguir:

Tabela 4. Cargas acumuladas teóricas permitidas de substâncias inorgânicas pela aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado em solos agrícolas.

Substâncias inorgânicas	Carga acumulada teórica permitida de substâncias inorgânicas pela aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado (kg/ha)
Arsênio	30
Bário	265
Cádmio	4
Chumbo	41
Cobre	137
Cromo	154
Mercurio	1,2
Molibdênio	13
Níquel	74
Selênio	13
Zinco	445

Art. 18. Para o manuseio e a aplicação do lodo de esgoto e seus produtos derivados, a UGL deverá informar ao proprietário, arrendatário, operadores e transportadores as seguintes exigências:

- I - restrições de uso da área e do lodo de esgoto ou produto derivado;
- II - limites da área de aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado estabelecidos no projeto agrônomico;
- III - técnicas e práticas adequadas de conservação de solo e água;
- IV - não aplicar lodo de esgoto ou produto derivado em condições de chuvas; V - evitar a aplicação manual de lodo de esgoto ou produto derivado Classe A;
- VI - para o lodo de esgoto ou produto derivado Classe B, fazer obrigatoriamente a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, com incorporação do lodo de esgoto ou produto derivado logo após a aplicação;
- VII - orientar os operadores quanto aos procedimentos de higiene e segurança e ao uso de equipamentos de proteção individual conforme legislação trabalhista;
- VIII - usar equipamento adequado e regulado de forma a garantir a taxa de aplicação prevista no projeto;
- IX - evitar a realização de cultivo ou outro trabalho manual na área que recebeu o lodo de esgoto ou produto derivado, por um período de 30 dias após a aplicação;
- X - em caso de colheita manual, a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado Classe B deverá ser feita no mínimo 6 meses antes da colheita;
- XI - para o lodo de esgoto ou produto derivado Classe B, tomar medidas adequadas para restringir o acesso do público às áreas de aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado, durante um período de 12 meses após a última aplicação. Estas medidas devem, necessariamente, incluir a colocação de sinalização indicando as atividades que estão sendo realizadas em cada local; e
- XII - o proprietário ou arrendatário deve notificar quaisquer situações de desconformidade com a execução do projeto agrônomico à UGL que deverá informar imediatamente aos órgãos competentes.

SEÇÃO VIII

Do Carregamento, Transporte e Estocagem

Art. 19. A UGL é responsável pelo procedimento de carregamento e transporte do lodo de esgoto ou produto derivado, devendo respeitar o disposto no Anexo VII desta Resolução.

Art. 20. A estocagem do lodo de esgoto ou produto derivado na propriedade deve se restringir a um período máximo de 15 dias, devendo atender aos seguintes critérios:

I - a declividade da área de estocagem não pode ser superior a 5%; e

II - a distância mínima do local de estocagem a rios, poços, minas e cursos d'água, canais, lagos e residências deverá respeitar o disposto no art. 15 desta Resolução.

Parágrafo único. É proibida a estocagem diretamente sobre o solo de lodo de esgoto ou produto derivado contendo líquidos livres, cuja identificação deverá ser feita pela norma brasileira vigente.

SEÇÃO IX

Do Monitoramento das Áreas de Aplicação do Lodo de Esgoto ou Produto Derivado

Art. 21. A UGL caracterizará o solo agrícola, antes da primeira aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado, observando o constante nos Anexos II e IV, quanto:

I - aos parâmetros de fertilidade; II - sódio trocável;

III - condutividade elétrica; e IV - substâncias inorgânicas.

§ 1º A utilização da área proposta para aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado dependerá da avaliação da qualidade do solo, realizada mediante a comparação dos resultados analíticos com valores orientadores de qualidade de solo, a critério do órgão ambiental competente.

§ 2º Para substâncias orgânicas, as concentrações permitidas no solo são as constantes na Tabela 2 do Anexo V desta Resolução.

§ 3º O monitoramento dos parâmetros de fertilidade do solo deve ser realizado, no mínimo a cada 3 anos, quando houver aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado na área em questão.

§ 4º O monitoramento dos parâmetros de fertilidade do solo deverá ser realizado antes de cada aplicação, no caso de lodo de esgoto ou produto derivado com estabilização alcalina.

§ 5º O monitoramento de substâncias inorgânicas no solo deverá ser realizado nos seguintes casos:

I - a cada aplicação, sempre que estas substâncias inorgânicas forem consideradas poluentes limitantes da taxa de aplicação;

II - quando a carga acumulada teórica adicionada para qualquer uma das substâncias inorgânicas monitoradas alcançar 80% da carga acumulada teórica permitida, estabelecida na Tabela 4, do art. 17 desta Resolução, para verificar se as aplicações subseqüentes são apropriadas; e

III - a cada 5 aplicações, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade do solo.

§ 6º O monitoramento de substâncias orgânicas no solo deverá ser realizado sempre que estas substâncias forem detectadas na caracterização do lote de lodo de esgoto ou produto derivado, devendo ser observadas as concentrações constantes da Tabela 2, do Anexo V, e os Anexos II e IV desta Resolução, sendo que a frequência deste monitoramento deve ser estabelecida pelo órgão ambiental competente.

§ 7º A critério do órgão ambiental competente, podem ser requeridos monitoramentos adicionais, incluindo-se o monitoramento das águas subterrâneas ou de cursos d'água superficiais.

Art. 22. A aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado na agricultura deve ser interrompida nos locais em que forem verificados danos ambientais ou à saúde pública.

SEÇÃO X

Das Responsabilidades

Art. 23. São de responsabilidade do gerador e da UGL o gerenciamento e o monitoramento do uso agrícola do lodo de esgoto ou produto derivado.

§ 1º Os resultados dos monitoramentos previstos nesta Resolução poderão, a qualquer momento, ser auditados pelo órgão ambiental.

§ 2º Quando comprovado o uso do lodo de esgoto ou produto com negligência, imprudência, imperícia, má-fé ou inobservância dos critérios e procedimentos previstos nesta Resolução, a responsabilidade será de seu autor.

Art. 24. São considerados responsáveis solidários pela qualidade do solo e das águas em áreas onde será aplicado o lodo de esgoto ou produto derivado:

I - o gerador do lodo de esgoto ou produto derivado;

II - a UGL que encaminhar o lodo de esgoto ou produto derivado para aplicação no solo; III - o proprietário da

- área de aplicação;
- IV - o detentor da posse efetiva; V - o técnico responsável;
- VI - o transportador; e
- VII - quem se beneficiar diretamente da aplicação.

Art. 25. O produtor, o manipulador, o transportador e o responsável técnico pelas áreas licenciadas, que irão receber aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado, deverão informar imediatamente ao órgão ambiental competente qualquer acidente ou fato potencialmente gerador de um acidente ocorrido nos processos de produção, manipulação, transporte e aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado, que importem em despejo acidental de lodo de esgoto ou produto derivado no meio ambiente.

SEÇÃO XI

Das Disposições Finais

Art 26. Para fins de fiscalização, a UGL deverá manter em arquivo todos os documentos referidos nesta Resolução, em especial os projetos agronômicos, relatórios e resultados de análises e monitoramento, por um prazo mínimo de dez anos.

Parágrafo único. Em caso de falência, dissolução ou liquidação da UGL, os documentos devem ser entregues ao órgão ambiental para serem apensados ao processo de licenciamento.

Art. 27. As informações previstas nesta Resolução integrarão um banco de dados, organizado e mantido pelo órgão ambiental licenciador, que deverá garantir a ampla divulgação e utilização de seus dados.

§ 1º A UGL deverá encaminhar ao órgão ambiental licenciador os resultados dos monitoramentos de solo e lodo de esgoto.

§ 2º A UGL deverá informar, anualmente, ao órgão ambiental licenciador as propriedades que receberam o lodo de esgoto, produtos derivados e respectivas quantidades, que deverá torná-los públicos, preferencialmente por meio eletrônico.

§ 3º Os órgãos ambientais integrantes do Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA estabelecerão, no prazo de noventa dias, a contar da data de publicação desta Resolução, instrução normativa no âmbito de sua competência, contemplando as informações que deverão ser encaminhadas pela UGL.

Art. 28. Os critérios técnicos adotados nesta Resolução poderão ser reformulados e/ou complementados a qualquer tempo de acordo com o desenvolvimento científico e tecnológico e a necessidade de preservação ambiental, saúde pública e manejo sustentável do solo, devendo ser revisada obrigatoriamente no sétimo ano de sua publicação.

Art. 29. O Ministério do Meio Ambiente coordenará grupo de monitoramento permanente para o acompanhamento desta Resolução, que deverá se reunir ao menos anualmente, contando com a participação de um representante e respectivo suplente dos órgãos de :

- I - saúde;
- II - agricultura;
- III - meio ambiente;
- IV - planejamento territorial das diferentes esferas de governo; V - de instituições de pesquisa e de ensino;
- VI - dos geradores de lodo de esgoto ou produto derivado; VII - das UGLs;
- VIII - das entidades representativas dos órgãos estaduais de meio ambiente; IX - dos órgãos municipais de meio ambiente; e
- X - das organizações não governamentais de meio ambiente.

Parágrafo único. O grupo de monitoramento de que trata o *caput* deste artigo deverá produzir e apresentar anualmente ao CONAMA relatório contendo recomendações que visem ao aperfeiçoamento desta Resolução.

Art. 30. O não cumprimento do disposto nesta Resolução sujeitará os infratores, entre outras, às penalidades e sanções, respectivamente, previstas na Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e no Decreto nº 3.179, de 21 de setembro de 1999.

Art. 31. Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

MARINA SILVA – Presidente do Conselho

ANEXO I

PROCESSOS PARA REDUÇÃO DE AGENTES PATOGENICOS E ATRATIVIDADE DE VETORES

A descrição dos processos de redução significativa de patógenos, redução adicional de patógenos e atratividade de vetores apresentados a seguir, foram baseados no estabelecido pela U.S.EPA, conforme 40 CFR Part 503 - Appendix B, Federal Register, de 19 de fevereiro de 1993. As listas abaixo relacionam os processos aceitos para redução significativa de patógenos (necessários para a obtenção de lodos de esgoto ou produto derivado tipo B), redução adicional de patógenos (necessários para a obtenção de lodos de esgoto ou produto derivado tipo A) e redução da atratividade de vetores. Outros processos poderão ser propostos, desde que haja comprovação de sua eficiência e seja aceito pelo órgão ambiental.

1. Processos de Redução Significativa de Patógenos

- a) digestão aeróbia - a ar ou oxigênio, com retenções mínimas de 40 dias a 20°C ou por 60 dias a 15°C;
- b) secagem em leitos de areia ou em bacias, pavimentadas ou não, durante um período mínimo de 3 meses;
- c) digestão anaeróbia por um período mínimo de 15 dias a 35-55°C ou de 60 dias a 20°C;
- d) compostagem por qualquer um dos métodos citados anteriormente, desde que a biomassa atinja uma temperatura mínima de 40°C, durante pelo menos cinco dias, com a ocorrência de um pico de 55°C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período; e
- e) estabilização com cal, mediante adição de quantidade suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12, por um período mínimo de duas horas.

2. Processos de Redução Adicional de Patógenos

- a) compostagem confinada ou em leiras aeradas (3 dias a 55°C no mínimo) ou com revolvimento das leiras (15 dias a 55°C no mínimo, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias ao longo dos 15 do processo);
- b) secagem térmica direta ou indireta para reduzir a umidade do lodo de esgoto ou produto derivado a 10% ou menos, devendo a temperatura das partículas de lodo de esgoto ou produto derivado superar 80°C ou a temperatura de bulbo úmido de gás, em contato com o lodo de esgoto ou produto derivado no momento da descarga do secador, ser superior a 80°C;
- c) tratamento térmico pelo aquecimento do lodo de esgoto ou produto derivado líquido a 180°C, no mínimo, durante um período de 30 minutos;
- d) digestão aeróbia termofílica a ar ou oxigênio, com tempos de residência de 10 dias a temperaturas de 55 a 60°C;
- e) processos de irradiação com raios beta a dosagens mínimas de 1 megarad a 20°C, ou com raios gama na mesma intensidade e temperatura, a partir de isótopos de Cobalto 60 ou Césio 137; e
- f) processos de pasteurização, pela manutenção do lodo de esgoto ou produto derivado a uma temperatura mínima de 70°C, por um período de pelo menos 30 minutos.

3. Processos para Redução da Atratividade de Vetores¹³¹

Nesta lista está indicado, entre parênteses, o número do critério a ser observado para verificação da aceitabilidade do processo quanto à redução de atratividade de vetores.

- a) digestão anaeróbia do lodo de esgoto ou produto derivado (critério 1 ou 2);
- b) digestão aeróbia do lodo de esgoto ou produto derivado (critério 1 ou 3 ou 4 ou 5);
- c) compostagem (critério 5);
- d) estabilização química (critério 6);
- e) secagem (critério 7 ou 8);
- f) aplicação subsuperficial (critério 9); e
- g) incorporação no solo (critério 10).

Estes processos serão aceitos apenas se forem atendidos os critérios especificados abaixo. Critérios para verificar se o processo de tratamento adotado para o lodo de esgoto ou produto derivado reduz o potencial de disseminação de doenças por meio de vetores (ex. moscas, roedores e mosquitos):

critério 1 – relacionado à digestão aeróbia ou anaeróbia: a concentração de sólidos voláteis (SV) deve ser reduzida em 38% ou mais. A redução de SV é medida pela comparação de sua concentração no afluente, do processo de estabilização de lodo de esgoto ou produto derivado (digestão aeróbia ou anaeróbia), com a sua concentração no lodo de esgoto ou produto derivado pronto para uso ou disposição;

critério 2 - relacionado à digestão anaeróbia: caso a redução de 38% de SV do lodo de esgoto ou produto derivado não seja atingida, após o mesmo ser submetido a um processo de digestão anaeróbia, o processo adotado será aceito apenas se em escala de laboratório a mesma amostra de lodo de esgoto ou produto derivado, após um período adicional de 40

dias de digestão, com temperatura variando entre 30 e 37 °C, apresentar uma redução de SV menor que 17%;

critério 3 - relacionado à digestão aeróbia: caso a redução de 38% de SV do lodo de esgoto ou produto derivado não seja atingida, após o mesmo ser submetido a um processo de digestão aeróbia, e o lodo de esgoto ou produto derivado possuir uma concentração de matéria seca (MS) inferior a 2%, o processo adotado será aceito apenas se em escala de laboratório a mesma amostra de lodo de esgoto ou produto derivado, após um período adicional de 30 dias de digestão, com temperatura mínima de 20 °C, apresentar uma redução de SV menor que 15%;

critério 4 - relacionado à digestão aeróbia: após o período de digestão, a taxa específica de consumo de oxigênio (SOUR - Specific Oxygen Uptake Rate) deve ser menor ou igual a 1,5 mg O₂/[hora x grama de sólidos totais (ST)] a 20°C;

critério 5 - relacionado à compostagem ou outro processo aeróbio: durante o processo, a temperatura deve ser mantida acima de 40° C por pelo menos 14 dias. A temperatura média durante este período deve ser maior que 45°C;

critério 6 - relacionado à estabilização química: a uma temperatura de 25°C, a quantidade de álcali misturada com o lodo de esgoto ou produto derivado, deve ser suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12 por um período mínimo de 2 horas, permanecendo acima de 11,5 por mais 22 horas. Estes valores devem ser alcançados sem que seja feita uma aplicação adicional de álcali;

critério 7 - relacionado à secagem com ventilação forçada ou térmica para lodos de esgoto ou produto derivado que não receberam adição de lodos primários brutos: após o processo de secagem, a concentração de sólidos deve alcançar no mínimo 75% MS, sem que haja mistura de qualquer aditivo. Não é aceita a mistura com outros materiais para alcançar a porcentagem exigida de sólidos totais;

critério 8 - relacionado à secagem por aquecimento ou ao ar para lodos de esgoto ou produto derivado que receberam adição de lodos primários brutos: após o processo de secagem, a concentração de sólidos deve alcançar no mínimo 90% MS, sem que haja mistura de qualquer aditivo. Não se aceita a mistura com outros materiais para alcançar a porcentagem exigida de sólidos totais;

critério 9 - relacionado à aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado no solo na forma líquida: a injeção do lodo de esgoto ou produto derivado líquido sob a superfície será aceita como um processo de redução de atração de vetores se: não for verificada a presença de quantidade significativa de lodo de esgoto ou produto derivado na superfície do solo após uma hora da aplicação. No caso de lodo de esgoto ou produto derivado classe A, a injeção do lodo de esgoto ou produto derivado deve ser feita num período máximo de até oito horas após a finalização do processo de redução de patógenos;

critério 10 - relacionado à aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado no solo: nesta situação, o lodo de esgoto ou produto derivado deve ser incorporado no solo antes que transcorram seis horas após a aplicação na área. Se o lodo de esgoto ou produto derivado for classe A, deve ser aplicado e incorporado decorridas, no máximo, oito horas após sua descarga do processo de redução de patógenos.

ANEXO II
CRITÉRIOS PARA AS ANÁLISES DE LODO DE ESGOTO OU PRODUTO DERIVADO
E DE SOLO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

1. Determinação de substâncias inorgânicas

As análises de substâncias inorgânicas a serem realizadas nas amostras de lodo de esgoto ou produto derivado e de solo devem permitir a determinação da totalidade da substância pesquisada que esteja presente na amostra bruta.

Para a determinação dos elementos: As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se e Zn nas amostras de lodo de esgoto ou produto derivado e de solo, deve-se empregar os métodos 3050 e 3051, estabelecidos no *U.S.EPA SW-846, versão "on line"* <<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/main.htm#table>>. Os resultados devem ser expressos em g ou mg do parâmetro por kg de lodo em base seca.

Para determinação das substâncias orgânicas no lodo de esgoto ou produto derivado e no solo, deverão ser adotados os métodos *U.S.EPA SW-846, última edição* ou outros métodos internacionalmente aceitos.

Referência:

U.S. EPA - United State Environment Protection Agency. SW-846. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical Chemical Methods.

2. Determinação da fertilidade do solo – pH, matéria orgânica, P, Ca, K, Mg, Na, H+Al, S, CTC e V%

As determinações de pH, matéria orgânica, P, Ca, K, Mg, Na, acidez potencial (H+Al), soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (CTC) e porcentagem de saturação em bases (V%) nos solos deverão ser realizadas de acordo com procedimento estabelecido por: Referências:

RAIJ, B. van; GHEYI, H.R.; BATAGLIA, O.C. Determinação da condutividade elétrica e de cátions solúveis em extratos aquosos de solos. In: Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001, p. 277-284.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1997, 212 p.

3. Determinação de pH, umidade, carbono orgânico, N total, N Kjeldahl, N amoniacal, N nitrato/nitrito, P total, K total, Ca total, Mg total, S total, Na total e sólidos voláteis e totais no lodo de esgoto ou produto derivado

As determinações de pH, umidade, carbono orgânico, N total, N Kjeldahl, N amoniacal, N nitrato/nitrito, P total, K total, Ca total, Mg total, S total, Na total e sólidos voláteis e totais no lodo de esgoto ou produto derivado deverão ser realizadas de acordo com os procedimentos adotados pela *U.S. EPA SW-846 versão "on line"* (<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/main.htm#table>). *BIGHAM (1996)* apresenta a metodologia a ser adotada para carbono orgânico (*NELSON & SOMMERS, 1996*), P total (*KUO, 1996*), N amoniacal (*BREMNER, 1996*), N total (*BREMNER, 1996*) e N nitrato/nitrito (*MULVANEY, 1996*). Para sólidos voláteis e N Kjeldahl adotar método estabelecido por *APHA et alii (2005)*. Os resultados devem ser expressos em mg do parâmetro por kg de lodo de esgoto ou produto derivado em base seca.

Referências:

BIGHAM, J.M. Methods of Soils Analysis. Part 3. Chemical Methods. Madison, WI. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Book Series n^o 5, 1996.

NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E., 1996. In: Bigham, J.M., p. 961-1010. KUO, S., 1996. In: Bigham, J.M., p. 869-919.

BREMNER, J.M., 1996. In: Bigham, J.M., p. 1085-1121. MULVANEY, R.L., 1996. In: Bigham, J.M., p. 1123-1200.

APHA - American Public Health Association; AWWA - American Water Works Association & WPCF - Water Pollution Control Federation, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 st ed. Washington, DC.

4. Determinação de condutividade elétrica em solo

As determinações da condutividade elétrica no solo deverão ser realizadas de acordo com o procedimento estabelecido por *CAMARGO et alii (1986)* ou *RAIJ et al. (2001)* em extrato na relação 1:1.

Referências:

RAIJ, B. van; GHEYI, H.R.; BATAGLIA, O.C. Determinação da condutividade elétrica e de cátions solúveis em extratos aquosos de solos. In: Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001, p. 277-284.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C., JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S., 1986. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Boletim Técnico n^o 106, Campinas, Instituto Agrônomo.

5. Determinação de indicadores microbiológicos e patógenos Coliformes termotolerantes:

US Environmental Protection Agency. Environmental Regulations and Technology - Control of Pathogens and Vector

Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage). Under 40 CFR Part 503. Appendix F: Sample Preparation for fecal coliform test and Salmonella sp. Analysis, p. 137, EPA/625/R-92/013, 2003. www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs CETESB. Coliformes fecais - Determinação em amostras de água pela técnica de tubos múltiplos com meio AI - Método de ensaio. Norma Técnica CETESB L5-406, 1992, 20 p.

Salmonella:

US Environmental Protection Agency. Environmental Regulations and Technology - Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage). Under 40 CFR Part 503. Appendix F: Sample Preparation for fecal coliform test and Salmonella sp Analysis, p. 137, EPA/625/R-92/013, 2003. www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs

Ovos viáveis de helmintos:

US Environmental Protection Agency. Environmental Regulations and Technology - Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage). Under 40 CFR Part 503. Appendix I - Test Method for Detecting, Enumerating, and Determining the Viability of Ascaris Ova in Sludge, p. 166, EPA/625/R-92/013, 2003. www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs

Vírus entéricos:

Os vírus entéricos a serem pesquisados preferencialmente serão: adenovírus e vírus do gênero *Enterovirus* (Poliovírus, Echovírus, Coxsackievírus). Em situações especiais - endêmicas ou epidêmicas - (surto de diarreia, hepatite A e outras viroses de transmissão fecal-oral), deve-se pesquisar rotavírus, vírus da hepatite A e outros, definidos pelo órgão ambiental, ouvido os órgãos competentes.

Referências:

US Environmental Protection Agency. Environmental Regulations and Technology - Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage). Under 40 CFR Part 503. Appendix H - Method for the recovery and assay of total culturable viruses from sludge, p. 150, EPA/625/R-92/013, 2003. www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs

CETESB. Método de concentração de lodo de esgoto para isolamento de enterovírus. Norma Técnica CETESB L5.506, 1988, 23p.

CETESB. Identificação de Enterovírus - Método de Ensaio. Norma Técnica CETESB L5.504, 1985, 22p.

Reação de amplificação em cadeia pela polimerase (PCR) para pesquisa de vírus DNA como adenovírus:

Santos, F.M.; Vieira, M. J.; Monezi, T.A.; Hársi, C.M.; Mehnert, D.U. Discrimination of adenovirus types circulating in urban sewage and surface polluted waters in São Paulo city, Brazil. Water Science Technologie, Water Supply vol. 4 (2): 79-85, 2004.

Reação de transcrição reversa seguida de amplificação em cadeia pela polimerase (RT-PCR) para pesquisa de vírus RNA como gênero *Enterovirus* (Poliovírus, Echovírus, Coxsackievírus), Rotavírus, Hepatite A e outros:

ARRAJ, A., BOHATIER, J. LAVERAN, H. AND TRAORE, O. Comparison of bacteriophage and enteric virus removal in pilot scale activated sludge plants. J. Applied Microbiol. 98: 516-524, 2005.

FORMIGA-CRUZ, M., HUNDESA, A., CLEMENTE-CASARES, P., ALBINANA-GIMENEZ, N., ALLARD, A., GIRONEZ, R. Nested multiplex PCR assay for detection of human enteric viruses in shellfish and sewage. J. Virol. Method, 125: 111-118, 2005.

Método de diluição *end-point* com cálculo de título por método de Reed-Muench e resultado expresso em DICT50 por 4 g:

HAWKE, A. General principles underlying laboratory diagnosis of viral infections. In: E.H. Lennette; N.G. Schmidt (Ed.) - Diagnostic procedures for viral, rickettsial and chlamydial infections. Washington, D.C., APHA, 1979. p. 3-48.

Resultado expresso em Unidades Formadoras de Focos (UFF) por 4 g:

BARARDI, CRM, EMSLIE, K, VESEY, G; WILLIAMS, K. Development of a rapid and sensitive quantitative assay for rotavirus based on flow cytometry. J. Virol. Method. 74: 31-38, 1998. MEHNERT, D.U.; STEWIEN, K.E. Detection and distribution of rotaviruses in raw sewage and creeks in São Paulo, Brazil. Appl. Environ. Microbiol., 59: 140-3, 1993.

6. Determinação da elevação de pH provocada por lodos de esgoto ou produto derivado tratados com cal

A curva de elevação de pH será obtida por ensaio de incubação utilizando mistura solo-lodo de esgoto ou produto derivado conforme descrito a seguir:

- a) Pesar 200 g do solo coletado no local onde se pretende fazer a aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado e adicionar o correspondente às seguintes doses de lodo de esgoto ou produto derivado, em toneladas/ha (base seca): 0, 10, 20, 40, 80.
- b) Homogeneizar a mistura e colocar em recipientes de material inerte.
- c) Adicionar água de modo a manter a umidade a 70% da capacidade máxima de retenção de água do solo, ao longo de todo o experimento.
- d) Os recipientes devem ser mantidos cobertos de maneira a evitar ressecamento. O ensaio deve ser feito com três repetições.
- e) mostrar o solo dos tratamentos com a mistura solo-lodo de esgoto ou produto derivado nos tempos 7, 14, 30, 45 e 60 dias e determinar o pH em CaCl₂, conforme RAIJ *et al.* (2001) ou EMBRAPA (1997), até que apresente valor constante em 3 determinações consecutivas.

f) A curva de elevação de pH será obtida através de gráfico da variação do pH final da mistura solo-lodo de esgoto ou produto derivado em função da dose (dose de lodo de esgoto ou produto derivado na abscissa e pH na ordenada).

Referências:

RAIJ, B. van; GHEYI, H.R.; BATAGLIA, O.C. *Determinação da condutividade elétrica e de cátions solúveis em extratos aquosos de solos*. In: Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001, p. 277-284.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. *Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Manual de métodos de análise do solo*. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1997, 212 p.

ANEXO III CÁLCULO DO NITROGÊNIO DISPONÍVEL NO LODO DE ESGOTO OU PRODUTO DERIVADO

Para o cálculo do nitrogênio disponível (N_{disp}) no lodo de esgoto ou produto derivado, deverão ser utilizadas as seguintes frações de mineralização (FM):

Lodo de esgoto não digerido	40%
Lodo de esgoto digerido aerobiamente	30%
Lodo de esgoto digerido anaerobiamente	20%
Lodo de esgoto compostado	10%

Referência:

NCDEHNR-North Carolina Department of Environment, Health and Natural Resources - Division of Environmental Management, *Land Application of Residual Solids, form LARS 06/94, North Carolina, 1994*.

Caso seja de interesse da UGL, poderão ser utilizadas frações de mineralização determinadas por meio de ensaios que adotem metodologias aceitas pelo órgão ambiental competente. Para produtos derivados estes ensaios deverão ser realizados.

O teor de N disponível do lodo de esgoto ou produto derivado é calculado pelas expressões:

Fórmula para cálculo do N_{disp} (mg/kg) para aplicação superficial

$$N_{disp} = (FM/100) \times (K_{Kj} - N_{NH_3}) + 0,5 \times (N_{NH_3}) + (N_{NO_3} + N_{NO_2})$$

do N_{disp} (mg/kg) para aplicação subsuperficial

$$N_{disp} = (FM/100) \times (N_{Kj} - N_{NH_3}) + (N_{NO_3} + N_{NO_2})$$

Dados necessários para o cálculo do N_{disp}:

fração de mineralização do nitrogênio (FM) (%);

Nitrogênio Kjeldahl (nitrogênio Kjeldahl = nitrogênio orgânico total + nitrogênio amoniacal (N_{Kj}) (mg/kg);

Nitrogênio amoniacal (N_{NH3}) (mg/kg);

Nitrogênio Nitrato e Nitrito (N_{NO3} + N_{NO2}) (mg/kg).

As concentrações utilizadas nestes cálculos devem ser em mg do parâmetro por kg de lodo de esgoto ou produto derivado em base seca.

ANEXO IV CRITÉRIOS PARA AMOSTRAGEM DE SOLO E LODO DE ESGOTO OU PRODUTO DERIVADO

1. Amostragem de solo

O número de amostras de solo deverá ser representativo da área a ser avaliada. A área amostrada deverá ser subdividida em parcelas homogêneas nunca superiores a 20 hectares, considerando o histórico de disposição de lodo de esgoto ou seus produtos derivados, a topografia, o tipo de solo e o tipo de cultura.

As parcelas deverão ser identificadas em mapa, em escala compatível, para o planejamento e o acompanhamento do monitoramento.

Em relação ao local da amostragem, deverá ser observado o seguinte critério:

- a) para culturas perenes, a amostragem deverá ser efetuada nas faixas adubadas com lodo de esgoto ou seus produtos derivados;
- b) para culturas anuais, a amostragem deverá ser efetuada, aleatoriamente, em zig-zague, em toda a área.

O tipo de amostragem deve ser selecionado em função dos parâmetros a serem analisados:

- a) Para substâncias não voláteis as amostras deverão ser compostas, para cada parcela homogênea, sendo que:

- a.1) para a profundidade de 0-20 cm, deverão ser coletadas 10 (dez) subamostras formando 1(uma) amostra composta;
- a.2) para a profundidade de 20-40 cm, deverão ser coletadas 2 (duas) subamostras formando uma amostra composta;
- a.3) para cada parcela, as subamostras deverão se coletadas na mesma profundidade, colocadas em um recipiente de material inerte, para posterior homogeneização.
- b) Para substâncias semi-voláteis ou voláteis, as amostras deverão ser simples, devendo ser coletada 1 (uma) amostra na profundidade de 0-20 cm e 1 (uma) amostra na profundidade de 20-40 cm.

O coletor das amostras deverá utilizar luvas descartáveis e evitar a contaminação cruzada da amostra.

Os requisitos básicos para acondicionamento, preservação e validade de amostras de solo deverão ser seguidos para cada parâmetro físico ou químico a ser determinado, de acordo com as instruções dos respectivos laboratórios de análise, para garantir a integridade das amostras.

2. Amostragem de lodo de esgoto ou produto derivado para análise de parâmetros inorgânicos, orgânicos e microbiológicos

Toda a amostragem de lodo de esgoto ou produto derivado, tanto para caracterização inicial quanto para monitoramento, deverá atender aos requisitos estabelecidos na norma brasileira de amostragem de resíduos.

2.1 Amostragem de lodo de esgoto ou produto derivado para análise de parâmetros inorgânicos

2.1.1 Caracterização inicial

Quando tratar-se de lodo de esgoto ou produto derivado digerido, a sua caracterização deverá ser feita por meio de análise de 4 (quatro) amostras simples, coletadas com defasagem mínima de 7 (sete) dias.

Quando o material amostrado não for digerido ou for heterogêneo, tal como pilhas de lodo de esgoto ou produto derivado em processo de compostagem ou secagem ao ar, a caracterização de substâncias inorgânicas deverá ser realizada a partir da coleta de 4 (quatro) amostras compostas, formadas por subamostras de iguais quantidades do material coletadas em diferentes pontos da pilha de amostragem.

2.1.2 Monitoramento

A frequência de amostragem para fins de monitoramento deverá observar o estabelecido no art. 10 desta Resolução. A amostragem deverá observar os mesmos procedimentos descritos no item 2.1.1.

2.2 Amostragem de lodo de esgoto ou produto derivado para análise de parâmetros orgânicos

Tanto a caracterização inicial quanto o monitoramento deverão seguir o estabelecido em relação à amostragem para análise de parâmetros inorgânicos, exceto no que se refere à formação de amostras compostas, visto que todas as amostras deverão ser simples.

2.3 Amostragem de lodo de esgoto ou produto derivado para análises microbiológicas e parasitológicas

2.3.1 Procedimento de coleta

As coletas de lodo de esgoto ou produto derivado destinadas a análises microbiológicas deverão ser realizadas conforme descrito na publicação da agência ambiental americana (U.S.EPA) "*Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*" - EPA/625/R-92/013, de julho de 2003.

A quantidade mínima de amostras a ser coletada deverá ser de 1000 g (peso úmido).

2.3.2 Caracterização inicial

Para caracterização inicial do lodo de esgoto ou produto derivado, deverão ser coletadas pelo menos 15 amostras num período de 3 meses. Essa amostragem deverá ser planejada de forma que as coletas sejam realizadas a intervalos relativamente uniformes abrangendo todo esse período.

Quando o material amostrado for heterogêneo (pilhas de lodo de esgoto ou produto derivado em processo de compostagem ou secagem ao ar), para que sejam obtidos resultados representativos, iguais quantidades do material deverão ser coletadas em diferentes pontos. Essas subamostras serão então combinadas e analisadas como uma amostra única, no conjunto de 15 amostras.

2.3.3 Monitoramento do lodo de esgoto ou produto derivado

Para monitoramento deverá ser coletada uma amostra, em quadruplicata, de acordo com a frequência estabelecida na Tabela 1 do art. 10 dessa Resolução. A qualidade do lodo de esgoto ou produto derivado deverá ser também verificada antes da primeira aplicação e quando o lodo de esgoto ou produto derivado for vendido ou distribuído. A amostragem deverá observar os mesmos procedimentos descritos no item 2.3.2.

ANEXO V
LISTAS DE SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS A SEREM DETERMINADAS NO LODO DE
ESGOTO OU PRODUTO DERIVADO E NO SOLO

Tabela 1. Substâncias orgânicas potencialmente tóxicas a serem determinadas no lodo de esgoto ou produto derivado

Substância	
Benzenos clorados	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
1,2-Diclorobenzeno	Benzo(a)antraceno
1,3-Diclorobenzeno	Benzo(a)pireno
1,4-Diclorobenzeno	Benzo(k)fluoranteno
1,2,3-Triclorobenzeno	Indeno(1,2,3-c,d)pireno
1,2,4-Triclorobenzeno	Naftaleno
1,3,5-Triclorobenzeno	Fenantreno
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno	Lindano
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	Poluentes Orgânicos Persistentes (POP's) Constantes da Convenção de Estocolmo
1,2,3,5-Tetraclorobenzeno	Aldrin
Ésteres de ftalatos	Dieldrin
Di-n-butil ftalato	Endrin
Di (2-etilhexil)ftalato (DEHP)	Clordano
Dimetil ftalato	Heptacloro
Fenóis não clorados	DDT
Cresóis	Toxafeno
Fenóis clorados	Mirex
2,4-Diclorofenol	Hexaclorobenzeno
2,4,6-Triclorofenol	PCB's
Pentaclorofenol	Dioxinas e Furanos

Tabela 2. Concentrações permitidas de substâncias orgânicas em solos agrícolas

Substância	Concentração permitida no solo (mg/kg)
Benzenos Clorados	
1,2-Diclorobenzeno	0,73
1,3-Diclorobenzeno	0,39
1,4-Diclorobenzeno	0,39
1,2,3-Triclorobenzeno	0,01
1,2,4-Triclorobenzeno	0,011
1,3,5-Triclorobenzeno	0,5
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno	0,16
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	0,01
1,2,3,5-Tetraclorobenzeno	0,0065
Ésteres de ftalatos	
Di-n-butil ftalato	0,7
Di (2-etilhexil)ftalato (DEHP)	1
Dimetil ftalato	0,25
Fenóis não clorados	
Cresóis	0,16
Fenóis clorados	
2,4-Diclorofenol	0,031
2,4,6-Triclorofenol	2,4
Pentaclorofenol	0,16
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	
Benzo(a)antraceno	0,025
Benzo(a)pireno	0,052
Benzo(k)fluoranteno	0,38
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	0,031
Naftaleno	0,12
Fenantreno	3,3
Lindano	0,001

ANEXO VI
MODELO DE DECLARAÇÃO A SER ENCAMINHADA PELA UNIDADE DE
GERENCIAMENTO DE LODO DE ESGOTO OU PRODUTO DERIVADO - UGL AO
PROPRIETÁRIO E AO ARRENDATÁRIO OU ADMINISTRADOR DA ÁREA DE APLICAÇÃO
DO LODO DE ESGOTO OU PRODUTO DERIVADO

O interessado deverá apresentar ao órgão ambiental a declaração a seguir, devidamente preenchida e assinada pelo representante da UGL e pelo proprietário, arrendatário ou administrador da área de aplicação.

Modelo de declaração

Parte 1: (a ser preenchida pela Unidade de Gerenciamento de Lodo - UGL)

- Nome da UGL
- Endereço
- Método utilizado para redução de patógenos do lodo de esgoto ou produto derivado
- Classe do lodo de esgoto ou produto derivado: Classe A Classe B
- Processo utilizado para a redução de vetores
- Teor de umidade do lodo de esgoto ou produto derivado (%)
- Concentração de substâncias inorgânicas e agentes patogênicos

	Unidade	Concentração (base seca)	Data da análise
Arsênio	mg/kg		
Bário	mg/kg		
Cádmio	mg/kg		
Cromo	mg/kg		
Cobre	mg/kg		
Chumbo	mg/kg		
Mercúrio	mg/kg		
Molibdênio	mg/kg		
Níquel	mg/kg		
Selênio	mg/kg		
Zinco	mg/kg		
Coliformes termotolerantes	NMP/g MS		
Vírus entéricos	UFP/4g ou UFF/4g MS		
Ovos viáveis de helmintos	nº de ovos viáveis/4g MS		

- Concentração de N disponível no lodo de esgoto ou produto derivado, em mg/kg (base seca), calculado conforme Anexo III:

data das análises: _____ N disponível: _____

- Taxa de Aplicação
- Tipo de cultura na qual será aplicado o lodo de esgoto ou produto derivado
- Denominação da área de aplicação
- Endereço do local de aplicação
- Campo/Parcela
- Área de aplicação (hectares)
- Quantidade aplicada (m³ ou kg)
- Método de aplicação
- Método usado em campo para redução de atração de vetores (se aplicável)

Obs: Em caso de diferentes culturas ou modos de aplicação, deverão ser preenchidas declarações correspondentes.

Estou ciente que, no caso de falsidade das declarações aqui prestadas, poderei ser responsabilizado, administrativa, civil e penalmente, conforme legislação pertinente em vigência.

Nome e assinatura do responsável pela UGL: _____

Data: _____

Parte 2: (a ser preenchida pelo proprietário, arrendatário ou administrador)

Eu, _____, RG nº _____,
proprietário da (sítio, fazenda, etc.) _____, localizada (endereço)
_____, coordenadas geográficas (UTM) _____, concordo com a aplicação de lodo de
esgoto ou produto derivado em minha propriedade, comprometendo-me a seguir as orientações constantes do projeto
elaborado pela UGL.

Nome e assinatura do proprietário: _____

Data: _____

ANEXO VII
RECOMENDAÇÕES QUANTO AO TRANSPORTE

1. O lodo de esgoto ou produto derivado somente será carregado e retirado da ETE ou UGL mediante a apresentação pelo motorista do caminhão, do Termo de Responsabilidade (nº 1 carregamento) e do Formulário de Controle de Retirada.

2. O motorista deve estar devidamente cadastrado e credenciado na empresa geradora do lodo de esgoto ou produto derivado.

3. Para o transporte deverão ser utilizados caminhões com carrocerias totalmente vedadas, tais como os caminhões basculantes, equipados com sistema de trava para impedir a abertura da tampa traseira, lona plástica para cobertura, cone de sinalização, pá ou enxada e um par de luvas de látex.

4. É proibido qualquer tipo de coroamento nos caminhões (altura da carga ultrapassando a altura da carroceria).

5. Os caminhões devem possuir algum tipo de sistema de comunicação para uso imediato em caso de ocorrência de sinistro.

6. Em caso de sinistro em vias públicas, com derramamento de lodo de esgoto, todos os procedimentos para limpeza são de responsabilidade da empresa transportadora do lodo de esgoto ou produto derivado.

7. Todos trabalhadores em contato com o lodo de esgoto ou produto derivado deverão sempre utilizar luvas de proteção plásticas ou de couro. Também é requerido o uso de calçado adequado, sapatos ou botas de couro ou plástico, sendo proibido o uso de sandálias e outros calçados abertos.

8. Ao término dos serviços, lavar com água e sabão as luvas, os calçados e as mãos.

9. Deverá ser observada a limpeza dos pneus na saída dos caminhões da ETE ou UGL.

Termo de Responsabilidade do Transportador do lodo de esgoto ou produto derivado

_____, ____ de _____ de 200__.

Eu, _____, portador do documento de identidade nº _____, declaro ter sido contratado pela empresa _____ para realizar o transporte do produto lodo de esgoto ou produto derivado entre a Estação de Tratamento de Esgoto da Companhia de Saneamento ou UGL _____ e a propriedade do *usuário-aplicador* situada _____

Declaro que farei o transporte, em conformidade com as recomendações da Companhia de Saneamento _____, utilizando caminhões com carrocerias totalmente vedadas, equipados com sistema de trava para impedir a abertura da tampa traseira, lona plástica para cobertura, cone de sinalização, pá ou enxada e um par de luvas de látex.

Informo estar ciente de que o produto somente poderá ser entregue na propriedade definida no Projeto Agrônômico nº _____, sendo que qualquer problema que venha a ocorrer durante o transporte ou em decorrência dele será de minha inteira responsabilidade.

Controle de Retirada do lodo de esgoto ou produto derivado

		Projeto nº
Logotipo Cia. de Saneamento	Controle de Retirada do lodo de esgoto por Terceiros	Documento
		Revisão/Data

Data: ____/____/____ Nº.

Destino: _____ Cidade: _____

Volume Retirado: _____ m³

Local de Retirada: Aterro Pátio Prensa

Motorista: _____

RG: _____

Transportadora: _____

Placa do Veículo: _____

Motorista declara estar ciente das precauções para o transporte de lodo de esgoto ou produto derivado descritas no verso:

Assinatura do motorista transportador

Via da portaria

Ao sair, é obrigatória a entrega deste boleto preenchido na portaria da ETE ou UGL.

Logotipo Companhia de Saneamento	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO _____
	Data: ____/____/____
	Volume de lodo de esgoto ou produto derivado retirado: _____ m ³

Precauções para o transporte do lodo de esgoto ou produto derivado.

1. O caminhão ou camioneta deverá ter trava de carroceria e a carroceria deverá ser totalmente vedada.
2. A carroceria deverá estar coberta com lona plástica.
3. O veículo deverá ter durante a viagem, uma pá e/ou enxada e um cone de sinalização.
4. Para contato direto com o lodo de esgoto ou produto derivado, usar luvas, e após este contato lavar as mãos e o calçado com água e sabão.

ETE ou UGL: _____

Endereço da ETE ou UGL: _____

Via do motorista transportador

ANEXO VIII ROTEIRO PARA ELABORAÇÃO DO PROJETO AGRONÔMICO

Para a elaboração de projetos de aplicação de lodos de esgoto ou produto derivado na agricultura, deve ser observado o seguinte roteiro:

1. Caracterização da instalação de tratamento de esgoto - ETE ou UGL

Apresentar descrição do sistema de tratamento incluindo a localização da estação de tratamento, a sua capacidade operacional, as características da bacia de drenagem de esgoto, o tipo de tratamento, o fluxograma simplificado do processo, as várias unidades do sistema e o volume de lodo de esgoto ou produto derivado gerado.

2. Caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado

Apresentar caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado, observando-se o estabelecido no art. 7^o desta Resolução.

Apresentar o ensaio para determinação de elevação de pH provocada pela aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado no solo, conforme item 6, do Anexo II desta Resolução, no caso de lodos de esgoto ou produto derivado tratados com cal.

Apresentar de forma detalhada a descrição dos processos adotados para redução de agentes patogênicos e de atratividade de vetores.

3. Caracterização das áreas de aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado

Apresentar nome e endereço do proprietário da área e declaração da UGL, conforme Anexo VI desta Resolução.

3.1 Localização

Apresentar plantas planialtimétricas de situação dos locais de aplicação propostos, com a escala mínima de 1:10.000, abrangendo até 500 m dos limites da aplicação, trazendo indicações dos seguintes elementos:

- a) indicação do uso do solo na área a ser utilizada para a aplicação;
- b) coordenadas geográficas (UTM) das áreas de aplicação;
- c) localização de nascentes e olhos d'água;
- d) localização de corpos d'água, indicando sua largura;
- e) localização de lagoas, lagos, reservatórios, captações, poços de abastecimento de água, residências;
- f) localização de matas nativas remanescentes;
- g) levantamento das unidades de conservação incidentes;
- h) descrição da vizinhança; e
- i) acessos ao local.

Nos locais onde não se dispuser do levantamento planialtimétrico na escala 1:10.000, serão aceitos, excepcionalmente, os levantamentos na escala 1:50.000, complementados por descrição detalhada da área e croqui com indicação das declividades das áreas de aplicação.

3.2 Caracterização do solo das áreas de aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado

Apresentar caracterização do solo, observando-se o estabelecido no art. 21 desta Resolução, devendo ser incluída planta com a localização dos pontos de amostragem.

4. Taxa de aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado

Apresentar a taxa de aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado no solo, observando o estabelecido no art. 17 desta Resolução, para cada área.

5. Armazenamento e transporte do lodo de esgoto ou produto derivado

Apresentar detalhamento dos sistemas de armazenamento e transporte de lodo de esgoto ou produto derivado, os quais deverão atender ao estabelecido nos arts. 19 e 20 e no Anexo VII desta Resolução.

6. Planos de aplicação e manejo

Apresentar plano de aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado e de manejo da área, atendendo ao art. 18 desta Resolução e demais exigências desta Resolução, incluindo:

- a) descrição da seqüência da aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado, detalhando períodos previsto para a aplicação ao longo do ano;
- b) indicação em planta das culturas de cada parcela; e
- c) descrição do manejo detalhando época de plantio e/ou desenvolvimento da cultura.

7. Relatório de operação

Elaborar relatório de operação, que deve ser mantido em arquivo pela UGL, onde devem constar os registros da

operação, contemplando minimamente:

- a) origem do lodo de esgoto ou produto derivado;
- b) caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado;
- c) data da aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado;
- d) localização da aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado (local, campo ou n^o da parcela);
- e) massa de lodo de esgoto ou produto derivado aplicado em toneladas (base seca) por hectare;
- f) totais anuais de lodo de esgoto ou produto derivado aplicado em toneladas secas por hectare;
- g) totais acumulados, desde o início da aplicação, em quilogramas por hectare, de cada metal avaliado;
- h) método de aplicação;
- i) tipo de vegetação existente ou cultura a ser implantada no local;
- j) quantidade de nitrogênio disponível aplicado, em kg/hectare; e
- l) observações quanto à ocorrência de chuvas por ocasião da aplicação e condições do solo quanto a erosões.

8. Monitoramentos

Apresentar descrição detalhada dos monitoramentos propostos para o acompanhamento da aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado, observando-se o disposto nos arts. 10 e 21 desta Resolução.

Deverão ser propostos modelos de relatório dos monitoramentos, do lodo de esgoto ou produto derivado e do solo das áreas de aplicação, a serem efetuados pelo responsável pela aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado.

9. Anotação de Responsabilidade Técnica

Apresentar a Anotação de Responsabilidade Técnica - ART do projeto agrônômico proposto. No preenchimento da ART deverá ser indicado o responsável pelo projeto quanto à escolha do local, taxa de aplicação e escolha do tipo de cultura, trazendo a anotação de tipo 1 no campo 6.

10. Informações adicionais

A critério do órgão ambiental, poderão ser exigidas informações adicionais que não constam deste roteiro.

Este texto não substitui o publicado no DOU, de 30 de agosto de 2006.

ANEXO B

RESOLUÇÃO CONAMA N° 380/2006

RESOLUÇÃO CONAMA nº 380, de 31 de outubro de 2006
Publicada no DOU nº 213, de 7 de novembro de 2006, Seção 1, página 59

Correlações:

· Retifica o Anexo I da Resolução CONAMA nº 375/06
Retifica a Resolução CONAMA nº 375/06 – Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, no uso das competências que lhe são conferidas pelos arts. 6º, inciso II e 8º, inciso VII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990 e suas alterações, tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, resolve:

Art. 1º O Anexo I, da Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006, publicada no Diário Oficial da União de 30 de agosto de 2006, Seção 1, página 141 a 146, retificada em 13 de setembro de 2006, Seção 1, página 80, passa a vigorar com a seguinte redação:

“.....

3. Processos para Redução da Atratividade de Vetores

Nesta lista está indicado, entre parênteses, o número do critério a ser observado para verificação da aceitabilidade do processo quanto à redução de atratividade de vetores.

- a) digestão anaeróbia do lodo de esgoto ou produto derivado (critério 1 ou 2);
- b) digestão aeróbia do lodo de esgoto ou produto derivado (critério 1 ou 3 ou 4 ou 5);
- c) compostagem (critério 5);
- d) estabilização química (critério 6);
- e) secagem (critério 7 ou 8);
- f) aplicação subsuperficial (critério 9); e
- g) incorporação no solo (critério 10).

Estes processos serão aceitos apenas se forem atendidos os critérios especificados abaixo.

Critérios para verificar se o processo de tratamento adotado para o lodo de esgoto ou produto derivado reduz o potencial de disseminação de doenças por meio de vetores (ex. moscas, roedores e mosquitos):

critério 1 – relacionado à digestão aeróbia ou anaeróbia: a concentração de sólidos voláteis (SV) deve ser reduzida em 38% ou mais. A redução de SV é medida pela comparação de sua concentração no afluente, do processo de estabilização de lodo de esgoto ou produto derivado (digestão aeróbia ou anaeróbia), com a sua concentração no lodo de esgoto ou produto derivado pronto para uso ou disposição;

critério 2 - relacionado à digestão anaeróbia: caso a redução de 38% de SV do lodo de esgoto ou produto derivado não seja atingida, após o mesmo ser submetido a um processo de digestão anaeróbia, o processo adotado será aceito apenas se em escala de laboratório a mesma amostra de lodo de esgoto ou produto derivado, após um período adicional de 40 dias de digestão, com temperatura variando entre 30 e 37 °C, apresentar uma redução de SV menor que 17%;

critério 3 - relacionado à digestão aeróbia: caso a redução de 38% de SV do lodo de esgoto ou produto derivado não seja atingida, após o mesmo ser submetido a um processo de digestão aeróbia, e o lodo de esgoto ou produto derivado possuir uma concentração de matéria seca (MS) inferior a 2%, o processo adotado será aceito apenas se em escala de laboratório a mesma amostra de lodo de esgoto ou produto derivado, após um período adicional de 30 dias de digestão, com temperatura mínima de 20 °C, apresentar uma redução de SV menor que 15%;

critério 4 - relacionado à digestão aeróbia: após o período de digestão, a taxa específica de consumo de oxigênio (SOUR - Specific Oxygen Uptake Rate) deve ser menor ou igual a 1,5 mg O₂/[hora x grama de sólidos totais (ST)] a 20°C;

critério 5 - relacionado à compostagem ou outro processo aeróbio: durante o processo, a temperatura deve ser mantida acima de 40° C por pelo menos 14 dias. A temperatura média durante este período deve ser maior que 45°C;

critério 6 - relacionado à estabilização química: a uma temperatura de 25°C, a quantidade de álcali misturada com o lodo de esgoto ou produto derivado, deve ser suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12 por um período mínimo de 2 horas, permanecendo acima de 11,5 por mais 22 horas. Estes valores devem ser alcançados sem que seja feita uma aplicação adicional de álcali;

critério 7 - relacionado à secagem com ventilação forçada ou térmica para lodos de esgoto ou produto derivado que não receberam adição de lodos primários brutos: após o processo de secagem, a concentração de sólidos deve alcançar no mínimo 75% MS, sem que haja mistura de qualquer aditivo. Não é aceita a mistura com outros materiais para alcançar a porcentagem exigida de sólidos totais;

critério 8 - relacionado à secagem por aquecimento ou ao ar para lodos de esgoto ou produto derivado que receberam adição de lodos primários brutos: após o processo de secagem, a concentração de sólidos deve alcançar no mínimo 90% MS, sem que haja mistura de qualquer aditivo. Não se aceita a mistura com outros materiais para alcançar a porcentagem exigida de sólidos totais;

critério 9 - relacionado à aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado no solo na forma líquida: a injeção do lodo de esgoto ou produto derivado líquido sob a superfície será aceita como um processo de redução de atração de vetores se: não for verificada a presença de quantidade significativa de lodo de esgoto ou produto derivado na superfície do solo após uma hora da aplicação. No caso de lodo de esgoto ou produto derivado classe A, a injeção do lodo de esgoto ou produto derivado deve ser feita num período máximo de até oito horas após a finalização do processo de redução de patógenos;

critério 10 - relacionado à aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado no solo: nesta situação, o lodo de esgoto ou produto derivado deve ser incorporado no solo antes que transcorram seis horas após a aplicação na área. Se o lodo de esgoto ou produto derivado for classe A, deve ser aplicado e incorporado decorridas, no máximo, oito horas após sua descarga do processo de redução de patógenos.

.....” (NR)

Art. 2º Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

MARINA SILVA – Presidente do Conselho

Este texto não substitui o publicado no DOU, de 7 de novembro de 2006.