

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**

**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E  
ECONÔMICOS DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DO  
DIGESTOR ANAERÓBIO PARA TRATAMENTO DE LODO  
DE ESGOTO**

**Luísa Santana Marques**

**Juiz de Fora**

**2014**

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E  
ECONÔMICOS DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DO  
DIGESTOR ANAERÓBIO PARA TRATAMENTO DE LODO  
DE ESGOTO**

**Luísa Santana Marques**

**Luísa Santana Marques**

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E  
ECONÔMICOS DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DO  
DIGESTOR ANAERÓBIO PARA TRATAMENTO DE LODO  
DE ESGOTO**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Área de concentração: Engenharia Ambiental e Sanitária

Linha de pesquisa: Biogás de ETE

Orientadora: Aline Sarmiento Procópio

Co-orientadora: Ana Sílvia Pereira Santos

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2014

**“AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS DO  
APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DO DIGESTOR ANAERÓBIO PARA  
TRATAMENTO DE LODO DE ESGOTO”**

**LUÍSA SANTANA MARQUES**

Trabalho Final de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com o artigo 9º da Resolução CCESA 4, de 9 de abril de 2012, estabelecida pelo Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 17 de dezembro de 2014.

Por:

---

Prof.<sup>a</sup>. DSc. Aline Sarmiento Procópio

---

Prof.<sup>a</sup>. DSc. Ana Sílvia Pereira Santos

---

Prof. DSc. Marconi Fonseca de Moraes

---

Prof.<sup>a</sup>. MSc. Michelle Matos de Souza

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceber o dom da vida, abençoar minhas decisões, iluminar meu caminho, e me proteger. Peço que continue ao meu lado para que eu saiba exercer a admirável arte de engenhar.

Aos meus pais, Neiva e Serafim, que são meus exemplos de vida. Obrigada pelo amor e dedicação incondicionais, e por me proporcionarem essa oportunidade singular e viverem comigo essa vitória. Agradeço também por vocês serem pais tão presentes e maravilhosos. Podem ter certeza que são peças fundamentais em todas as minhas conquistas. Não tenho nem como expressar a minha gratidão, apenas dizer: eu amo vocês!

Ao meu querido irmão, Luís Everaldo, por ser minha grande fonte de inspiração. Você é muito especial na minha vida, e pode ter certeza que sempre estarei ao seu lado.

Ao meu amor, Victor, por todo apoio, carinho, atenção, vibração com todas as minhas conquistas, que na verdade são nossas. Agradeço a Deus todos os dias por ter colocado em minha vida uma pessoa tão sublime como você. Obrigada pelo ombro em cada momento difícil que você me ajudou a atravessar, por estar sempre ao meu lado, de corpo ou de alma e por tudo o que você transformou na minha vida, por cuidar de mim! Agradeço também a toda a sua família, que já considero como minha.

À minha família maravilhosa, não deixando de lembrar da minhas queridas vó e bisavó, o Théo, minha tia e meus tios. Obrigada por todo incentivo, apoio e carinho: vocês são a maior torcida do Brasil.

A todos os amigos que fiz em Juiz de Fora: gostaria de agradecer por todos os momentos que compartilhamos: trabalhos, provas, momentos de nervosismo e também de descontração, além de dúvidas sobre o futuro profissional. Agradeço principalmente ao Quarteto Fantástico, pela amizade e carinho de sempre. Espero que nossa amizade seja eterna pois levarei vocês no coração em toda a minha caminhada daqui em diante.

A esta universidade e aos mestres do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior. Obrigada por serem a base de todo o conhecimento e experiência passados. Gostaria de agradecer especialmente aos mestres Otávio e Fabiano por toda sabedoria e conselhos: foram fundamentais na minha formação. E também às queridas orientadoras Aline e Ana Sílvia, pelo suporte e paciência durante todo o trabalho realizado. Obrigada por serem tão fascinantes e inspiradoras.

E a todos que acreditaram em mim: **MUITO OBRIGADA!**

## RESUMO

O biogás é o gás proveniente de processos anaeróbios, sendo produzido, por exemplo, em digestores anaeróbios de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Os digestores anaeróbios fazem parte do fluxograma do Tratamento do Lodo, tendo como principal finalidade a estabilização da matéria orgânica presente nos lodos frescos. O biogás proveniente dos digestores anaeróbios também contribui para o agravamento do aquecimento global, uma vez que o mesmo é composto basicamente por metano e dióxido de carbono, ou seja, gases que são considerados vilões do efeito estufa. Além disso, esse biogás possui considerável poder calorífico, o qual permite o seu aproveitamento como fonte de energia, visando redução do impacto ambiental e dos gastos com energia elétrica. Assim, o foco principal desse estudo é avaliar os benefícios ambientais e econômicos proporcionados pelo uso do biogás de ETEs. No presente trabalho, foi estimada a produção de biogás a partir de dados obtidos de quatro Companhias de Saneamento (COPASA, SABESP, CEDAE e CAESB) localizadas nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e no Distrito Federal. Para a realização dos cálculos foram utilizadas três metodologias distintas: avaliação do potencial de geração de biogás, através da estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto; estimativa dos gases de efeito estufa (GEEs), segundo metodologia estabelecida pelo *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC, 2006); e estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, segundo metodologia estabelecida pelo *Environmental Protection Agency* (EPA, 2010). Ainda foi possível estimar a quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás, o potencial energético do biogás e o respectivo lucro obtido a partir desse potencial. Além disso, foi determinado o total de dióxido de carbono equivalente a partir dos resultados das metodologias utilizadas, a fim de fazer uma comparação com outros setores que também contribuem com as emissões brasileiras de gases de efeito estufa.

**Palavras-chaves:** ETE, digestor anaeróbio, biogás, gases de efeito estufa.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1    Objetivo geral .....	3
2.2    Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1    Estações de tratamento de esgoto .....	4
3.1.1    Tratamento da Fase Líquida .....	8
3.1.2    Tratamento da Fase Sólida .....	11
3.1.3    Biogás .....	13
3.2    Gases de efeito estufa .....	17
3.2.1    Participação do setor de tratamento de resíduos na emissão de GEE .....	20
4. METODOLOGIA .....	23
4.1    As Estações Tratamento Esgoto Avaliadas .....	23
4.2    Avaliação do potencial de geração de biogás.....	25
a)    Estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto.....	25
b)    Estimativa da quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás.....	26
c)    Estimativa do potencial energético do biogás e seu respectivo lucro.....	27
4.3    Estimativa dos gases de efeito estufa segundo metodologia estabelecida pelo IPCC.....	28
4.4    Estimativa das emissões de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> segundo metodologia estabelecida pelo EPA.....	30
4.5    Determinação do dióxido de carbono equivalente segundo metodologia estabelecida pelo EPA .....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	33
5.1    Avaliação do potencial de geração de biogás.....	33
a)    Estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto.....	33

b)	Estimativa da quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás.....	34
c)	Estimativa do potencial energético do biogás e seu respectivo lucro.....	35
5.2	Estimativa dos gases de efeito estufa segundo metodologia estabelecida pelo IPCC.....	39
5.3	Estimativa das emissões de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> segundo metodologia estabelecida pelo EPA.....	40
5.4	Determinação do dióxido de carbono equivalente segundo metodologia estabelecida pelo EPA.....	41
5.5	Análise comparativa entre os resultados .....	44
6.	CONCLUSÕES.....	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Coleta e tratamento de esgoto dos municípios brasileiros.....	4
Figura 3.2 - Representação espacial do índice de atendimento urbano por rede coletora de esgotos dos municípios cujos prestadores de serviços são participantes do SNIS em 2012, distribuído por faixas percentuais, segundo município.....	6
Figura 3.3 - Representação espacial do índice de tratamento dos esgotos gerados dos participantes do SNIS em 2011, distribuído por faixas percentuais, segundo município.....	7
Figura 3.4 - Esquema das unidades da etapa dos lodos ativados.....	10
Figura 3.5 - Fluxograma convencional de tratamento de lodo.....	12
Figura 3.6 - Composição típica do biogás.....	14
Figura 3.7 - Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil, ano base 2013.....	16
Figura 3.8 - Média global da concentração de CO <sub>2</sub> atmosférico. A linha vermelha representa as médias mensais das observações realizadas pelo SIO (Scripps Institution of Oceanography), e a linha azul representa as médias semanais das observações do NOAA/ESRL/GMD.....	19
Figura 3.9 - Média global da concentração de CH <sub>4</sub> atmosférico. A linha verde representa as médias trimestrais das observações realizadas pelo UCI (medidos quatro vezes ao ano). A linha vermelha representa as médias mensais das observações do AGAGE, e a linha azul representa as médias semanais das observações do NOAA/ESRL/GMD.....	19
Figura 3.10 - Projeção de crescimento da população brasileira.....	21
Figura 3.11 - Emissões do setor de tratamento de resíduos.....	21
Figura 5.1 - Valores de potência consumida e produzida obtida através do aproveitamento do biogás.....	38
Figura 5.2 - Valores custo operacional e lucro obtido através do aproveitamento do biogás.....	38
Figura 5.3 - Emissões brasileiras de gases de efeito estufa no período 1990-2010 em CO <sub>2</sub> eq.....	43
Figura 5.4 - Variação da participação de cada setor, de 2005 para 2010.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características típicas do sistema de tratamento Lodo Ativado Convencional....	10
Tabela 3.2 - Processos para tratamento do lodo. ....	12
Tabela 3.3 - Poder calorífico de alguns gases. ....	15
Tabela 3.4 - Fontes de energias por biomassa utilizadas no Brasil – Fase: Operação. ....	17
Tabela 3.5 - Evolução das emissões de GEEs no Brasil por setor – 1990 a 2010.....	20
Tabela 3.6 - Emissões de gases de efeito estufa pelo setor de tratamento de resíduos. ....	22
Tabela 4.1 – Estações de Tratamento de Esgoto e seus respectivos dados de população e de vazão. ....	23
Tabela 4.2 - Potencial de Aquecimento Global para alguns gases de efeito estufa. ....	32
Tabela 5.1 - Estimativa da produção diária de biogás para cada uma das ETEs avaliadas.....	33
Tabela 5.2- Estimativa da geração anual de metano e dióxido de carbono presente no biogás gerado em volume e em massa. ....	34
Tabela 5.3 - Cálculo de índices das ETEs avaliadas constituintes da tecnologia de lodo ativado. ....	35
Tabela 5.4 - Estimativa da energia bruta produzida anualmente a partir do biogás.....	36
Tabela 5.5 - Valores de potência consumida e produzida e valores de custo operacional e lucro obtido através do aproveitamento do biogás. ....	37
Tabela 5.6 - Estimativa da geração anual do gás metano segundo metodologia estabelecida pelo IPCC. ....	40
Tabela 5.7 - Estimativa das emissões anuais de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> segundo metodologia estabelecida pelo EPA.....	41
Tabela 5.8 - Valores estimados convertidos para unidade comum - Dióxido de carbono equivalente.....	42
Tabela 5.9 - Valores encontrados para a geração de metano nas três metodologias utilizadas. ....	44
Tabela 5.10 – Valores de emissão de metano encontrados pelas três metodologias utilizadas e dados apresentados no trabalho de ZANETTE (2009).....	46

## 1. INTRODUÇÃO

Preocupações ambientais com relação ao aquecimento global têm se tornado relevantes devido aos gases de efeito estufa de origem antrópica, como o gás carbônico e o metano. No Brasil, os principais setores que contribuem para a emissão desses gases na atmosfera são os seguintes: energia, processos industriais, agropecuária, mudança de uso da terra e florestas e tratamento de resíduos orgânicos (MCTI, 2013).

No presente trabalho, maior destaque é dado ao lodo gerado em ETEs que compõe o setor de resíduos sólidos orgânicos. Este setor contribui para o aquecimento global principalmente a partir da digestão da matéria orgânica em processos anaeróbios. Esses processos produzem um gás que é conhecido como biogás, e possui essencialmente metano e gás carbônico em sua composição.

A digestão anaeróbia, desenvolvida principalmente com o objetivo de tratar resíduos e efluentes orgânicos, vem sendo cada vez mais utilizada por permitir a recuperação de energia através do aproveitamento do biogás, bem como prevenir a poluição ambiental (IEA, 2005 apud ZANETTE, 2009). Dessa forma, devido ao poder calorífico do biogás, gerado no interior de digestores do tratamento de lodo, este pode ser utilizado como fonte de energia.

Antigamente, era prática comum deixar escapar biogás proveniente das ETEs para a atmosfera sem qualquer preocupação com o meio ambiente. Entretanto, tendo em vista aspectos de segurança, de poluição ambiental, e a possibilidade de aproveitamento do biogás, essa situação foi revertida. A NBR 12.209/2011 recomenda que o biogás, quando não aproveitado, deve ser minimamente queimado, pois a queima é uma das formas de mitigar os efeitos adversos dessa emissão (JORDÃO & PESSOA, 2014).

Entretanto, são muitos os benefícios proporcionados ao meio ambiente devido ao aproveitamento do biogás para a geração de energia, o qual seria lançado para a atmosfera. Segundo MACHADO (2011), o uso da biomassa como fonte de energia renovável e sustentável permite diversificar a matriz energética, além de reduzir a emissão de gases do efeito estufa.

Assim, a geração de biogás é uma questão que tem levado a buscas por soluções que atendam não somente a sustentabilidade ambiental, mas também a perspectiva econômica. De acordo com MACHADO (2011), alternativas de fontes renováveis de energia têm sido objeto de pesquisas no mundo inteiro a fim de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e os

impactos globais causados pela sua queima e de encontrar soluções sustentáveis para colaborar com a matriz energética.

Para a seleção da forma de utilização de energia deve-se levar em conta aspectos econômicos e operacionais e até mesmo o custo local da energia convencional. Diante disso, o biogás pode ser aproveitado de distintas formas, tais como: geração de energia elétrica, geração de energia térmica, cogeração (geração conjunta de energia elétrica e energia térmica), e aproveitamento do gás gerado como combustível para outras unidades na própria estação de tratamento (JORDÃO & PESSOA, 2014).

Diante disso, a importância das questões relacionadas com as emissões dos gases de efeito estufa aliadas a uma fonte renovável e disponível de energia indicam à necessidade de estudos de viabilidade técnica e econômica em cada ETE para o aproveitamento energético do biogás.

Assim, o presente trabalho tem a intenção de apresentar os benefícios econômicos e ambientais para o reuso do biogás gerado em ETEs.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar os benefícios ambientais e econômicos do aproveitamento do biogás gerado em digestores anaeróbios de tratamento de lodo de esgoto doméstico.

### **2.2 Objetivos específicos**

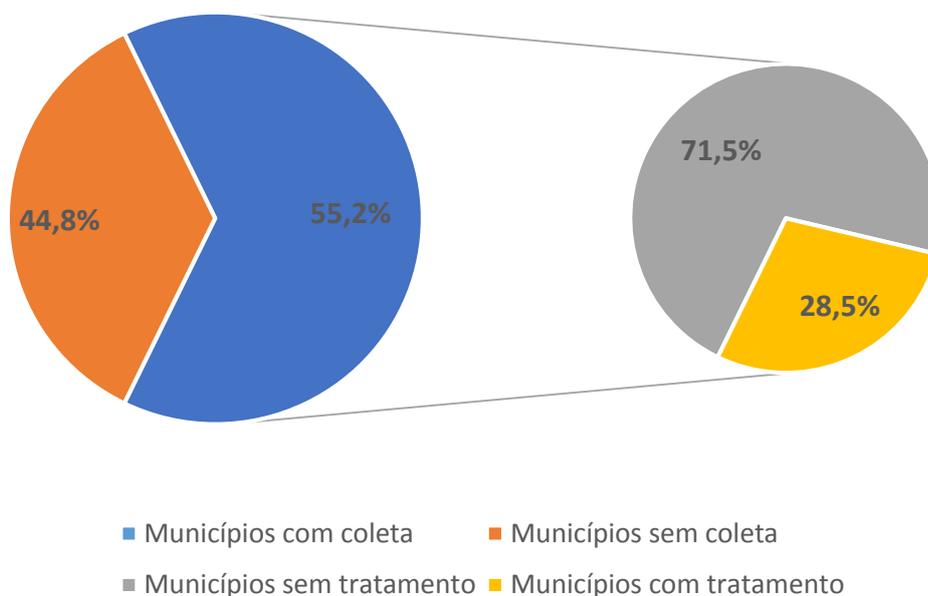
- Estimar a capacidade de produção de biogás proveniente do tratamento anaeróbio do lodo em determinadas ETEs brasileiras.
- Quantificar o potencial de geração de energia proveniente deste biogás produzido nas ETEs analisadas.
- Quantificar a emissão de gases de efeito estufa originários dessas ETEs através de três metodologias distintas.
- Calcular o total de dióxido de carbono equivalente gerado no tratamento do lodo dessas ETEs e realizar uma comparação dos resultados.
- Comparar a produção de metano entre as estimativas realizadas no presente trabalho e dados de produção de metano encontrados na bibliografia.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Estações de tratamento de esgoto

O lançamento indiscriminado dos esgotos sem tratamento nos corpos d'água pode causar efeitos adversos aos usos das águas. No Brasil, a principal fonte de poluição dos corpos d'água é ainda o lançamento de esgotos domésticos, pois isto ainda é prática comum no país. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento – PNSB (2008), 44% dos domicílios, no ano da pesquisa, tinham acesso a rede geral de esgoto, o equivalente a 55,2% dos municípios brasileiros com serviço de esgotamento sanitário. Sendo que, a pesquisa ressalta que a estatística de acesso a rede coletora de esgoto refere-se apenas a existência do serviço no município, sem considerar a extensão da rede, a qualidade do atendimento, o número de domicílios atendidos, ou se o esgoto, depois de coletado é tratado.

Ainda, a estimativa dos municípios brasileiros que fazem o tratamento de seu esgoto é de apenas 28,5%, e apesar de menos de 1/3 dos municípios efetuarem tratamento de esgoto, o volume tratado representava, em 2008, 68,8% do que era coletado, conforme demonstrado na Figura 3.1 (PNSB, 2008).



Fonte: Adaptado de PNSB, 2008.

Figura 3.1 - Coleta e tratamento de esgoto dos municípios brasileiros.

Somente a título de comparação, no Brasil, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, em seu último Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2012, lançado recentemente, em abril de 2014, aproximadamente 56% da população é atendida com coleta de esgoto. Em relação ao esgoto gerado, somente 38,7% sofre algum tipo de tratamento e em relação ao esgoto coletado, o índice de tratamento é de 69,4%.

As Figuras 3.2 e 3.3 demonstram a distribuição geográfica no território brasileiro dos índices de atendimento urbano de rede coletora de esgoto sanitário no ano de 2012 e de tratamento de esgoto, no ano de 2011, respectivamente.

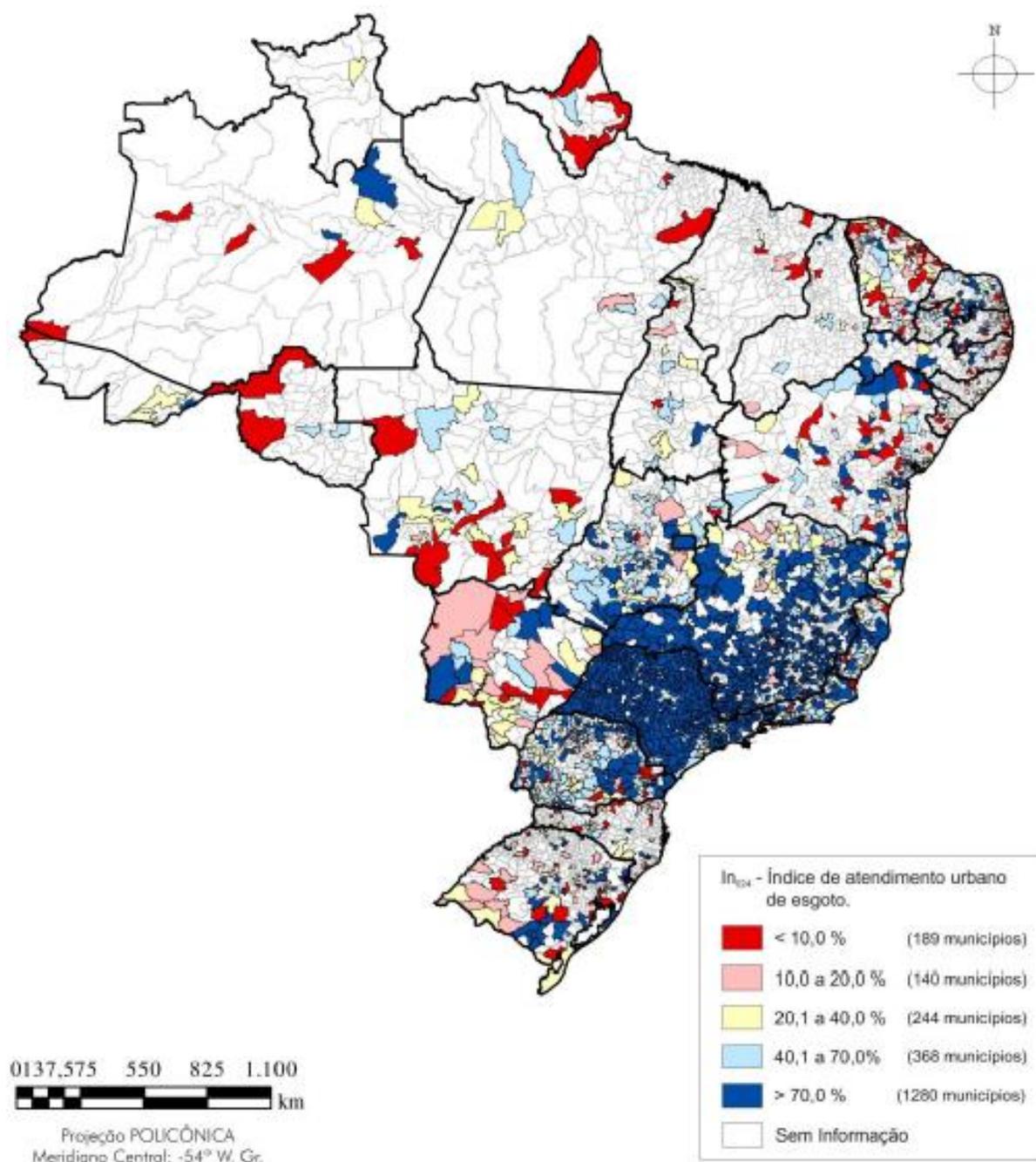
É possível perceber a concentração desses serviços nas regiões mais desenvolvidas do país, aquelas que possuem uma maior concentração da população. Segundo JORDÃO & PESSOA (2014), a geração dos diversos resíduos decorrentes das atividades humanas, inclusive lodo de ETE está diretamente relacionada com a população urbana, seu padrão de vida e hábitos de consumo.

Existem exigências legais que possuem indicativos de padrões e parâmetros de qualidade, tais como a Lei 6.938/1981. Esta institui a Política Nacional de Meio Ambiente e fornece subsídios para o estabelecimento dos padrões de qualidade ambiental, a avaliação de impactos ambientais e o licenciamento de atividades poluidoras. Existem também outros instrumentos que constituem o arcabouço da legislação federal relacionada ao meio ambiente: Resolução CONAMA 357/2005 que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e dá diretrizes para enquadramento; Resolução CONAMA 430/2011 que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes; e alguns estados da federação apresentam suas legislações específicas para padrões de lançamento de efluentes. No caso de Minas Gerais, esta é a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 1 de 2008.

Deste modo, vale ressaltar que, embora existam hoje exigências legais e uma grande preocupação em relação ao tratamento, destino final dos esgotos e a suas consequências sobre o meio ambiente, o Brasil ainda tem um longo caminho a percorrer na área de saneamento.

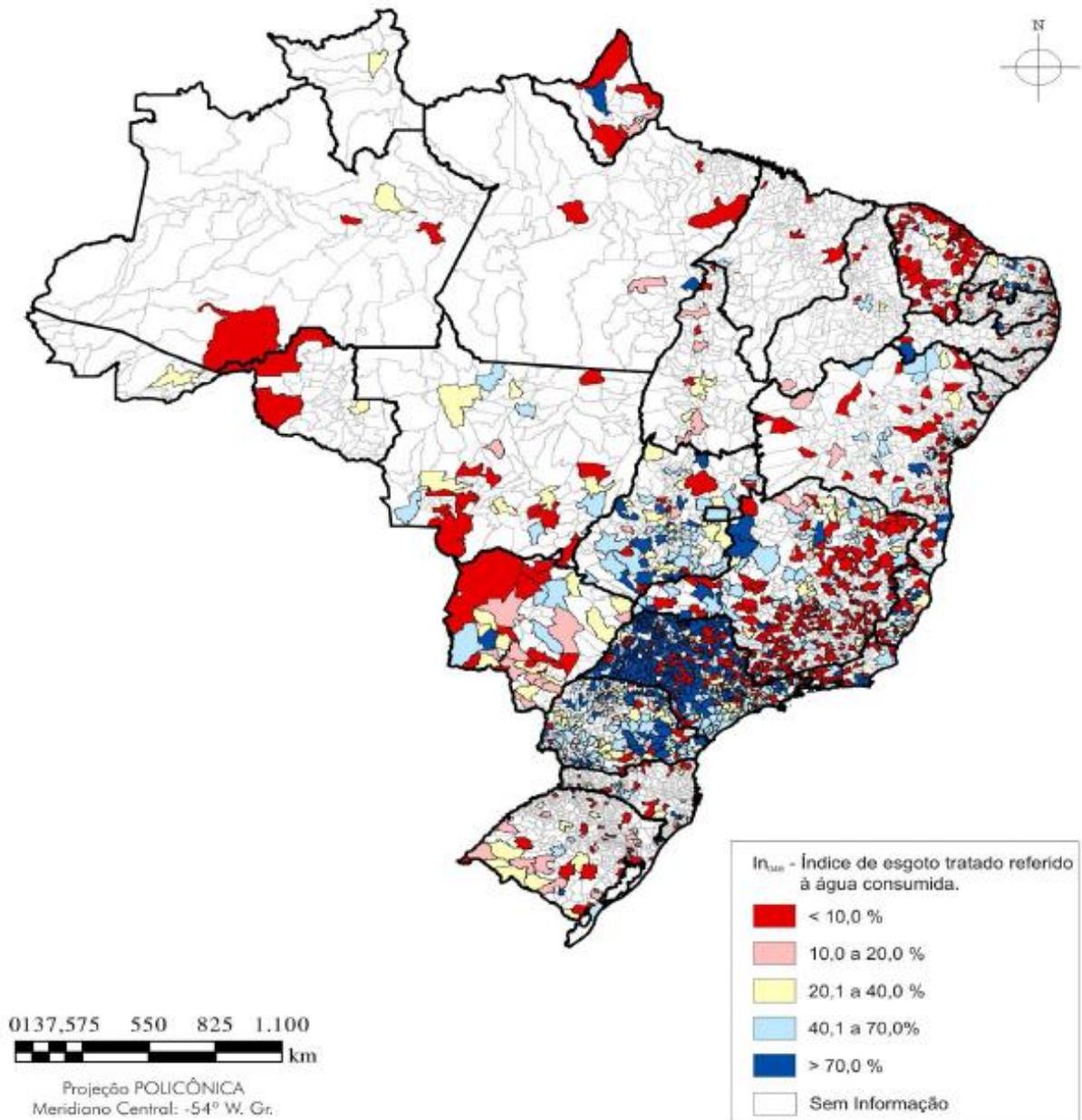
Sabe-se que os esgotos lançados nos corpos d'água podem impactar negativamente na qualidade dos recursos hídricos, podendo acarretar alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas. Assim, o grau de tratamento submetido ao efluente doméstico é função do corpo receptor, das características de uso da água a jusante do ponto de lançamento, da sua

capacidade de autodepuração e das características e condições dos despejos (JORDÃO & PESSOA, 2014).



Fonte: SNIS, 2012.

*Figura 3.2 - Representação espacial do índice de atendimento urbano por rede coletora de esgotos dos municípios cujos prestadores de serviços são participantes do SNIS em 2012, distribuído por faixas percentuais, segundo município.*



Fonte: SNIS, 2011.

*Figura 3.3 - Representação espacial do índice de tratamento dos esgotos gerados dos participantes do SNIS em 2011, distribuído por faixas percentuais, segundo município.*

Deste modo, sistemas de tratamento de esgoto têm como objetivo a remoção da matéria orgânica solúvel, sólidos em suspensão, organismos patogênicos e contaminantes químicos em efluentes antes que sejam lançados de volta ao meio ambiente (EPA, 2010). E o grau de tratamento adequado dos esgotos é alcançado através de uma série de operações unitárias, empregadas para a remoção ou transformação de substâncias indesejáveis (JORDÃO & PESSOA, 2014).

Isso posto, as ETEs são usadas para tratar esgotos domésticos e podem incluir uma variedade de processos, distribuídos nas etapas de tratamentos preliminar, primário, secundário e terciário, que são classificados em função da remoção dos sólidos em suspensão e da demanda bioquímica ou química de oxigênio (VON SPERLLING *et al.*, 1997).

O tratamento preliminar consiste no conjunto de operações e processos unitários que visam a remoção de sólidos grosseiros, areia e material oleoso. O tratamento primário visa, principalmente, a remoção de sólidos em suspensão. O tratamento secundário visa a remoção da matéria orgânica. E o tratamento terciário objetiva a remoção de nutrientes ou de microrganismos (NBR 12.209, 2011).

Ainda, os processos de tratamento de esgoto podem ser classificados em processos físicos, químicos, ou biológicos. Os processos físicos têm como objetivo separar as substâncias em suspensão no esgoto. Os processos químicos são caracterizados pela utilização de produtos químicos. E os processos biológicos são os processos que dependem da ação dos microrganismos presentes nos esgotos (JORDÃO & PESSOA, 2014).

O tratamento biológico é um processo eficaz para a redução, remoção ou transformação de compostos orgânicos e nutrientes, normalmente encontrados em efluentes domésticos, para uma forma ou concentração aceitável antes da descarga ou reutilização (EPA, 2010).

No tratamento biológico, a matéria orgânica presente no efluente doméstico é convertida pela ação bioquímica de microrganismos. Dentre os processos biológicos existentes, destacam-se a oxidação biológica aeróbia e a fermentação anaeróbia. No ambiente aeróbio, o material orgânico é oxidado, na presença de oxigênio, para produtos inorgânicos, principalmente gás carbônico e água. Já no ambiente anaeróbio, desenvolvem-se processos, na ausência de oxigênio, que se caracterizam pelo fato de o material orgânico sofrer transformações sem, contudo ser oxidado. Assim, a digestão anaeróbia é um processo em que seus principais produtos são o metano e o dióxido de carbono (PROSAB, 1999).

### ***3.1.1 Tratamento da Fase Líquida***

Conforme já mencionado, o tratamento da fase líquida pode ser alcançado por via aeróbia ou anaeróbia. No caso do tratamento anaeróbio, destaca-se o Reator UASB (*Upflow Anaerobic*

*Sludge Blanket*), além das lagoas anaeróbias. Em relação ao tratamento aeróbio, além das lagoas de estabilização, são utilizados processos com biomassa suspensa e/ou aderida.

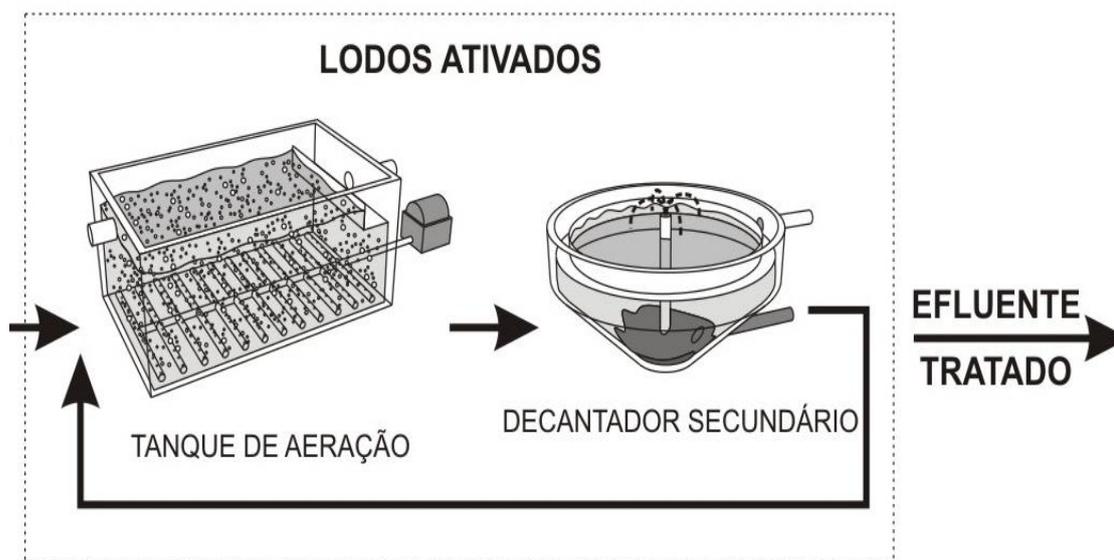
As tecnologias que adotam biomassa suspensa são processos de lodo ativado e suas variantes e as que adotam biomassa aderida, são as variações dos filtros que utilizam meio suporte para aderência dos microrganismos.

No presente trabalho, maior destaque será dado à tecnologia de lodo ativado, já que os exemplos utilizados para estimativa de geração de biogás são estações que possuem essa tecnologia nos seus fluxogramas.

O lodo ativado convencional tem por finalidade a remoção de substâncias orgânicas dissolvidas, semidissolvidas e finamente particuladas. Esse processo é considerado tratamento secundário no fluxograma da fase líquida e sua eficiência típica pertence a faixa de 85-95% para DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio); 85-95% tanto para SST (Sólidos em Suspensão Totais) e quanto para organismos coliformes (JORDÃO & PESSOA, 2014). Ressalta-se que os desempenhos apresentados pelo processo descrito, para DBO e SST são bastante elevados em comparação com outras tecnologias do mesmo grau, porém em relação ao desempenho de remoção de organismos coliformes, essas eficiências são insatisfatórias.

De acordo com JORDÃO & PESSOA (2014), no processo de lodo ativado (Figura 3.4), o esgoto afluente e o lodo ativado são continuamente misturados, agitados e aerados por sistema de aeração artificial (chamados tanques de aeração). Após essa etapa, o lodo excedente segue para os decantadores secundários onde ocorre a sedimentação dos sólidos, permitindo que o efluente final saia clarificado.

Nesse processo, o tempo de detenção do líquido é baixo, da ordem de horas, enquanto que os sólidos permanecem no sistema por um tempo superior devido a recirculação. Deste modo, a biomassa tem maior tempo para metabolizar a matéria orgânica presente nos esgotos, garantindo a elevada eficiência desses sistemas (VON SPERLLING *et al.*, 1997). Além disso, visto que, as necessidades de oxigênio dos flocos no tanque de aeração são elevadas, é necessária a injeção forçada de ar no meio líquido, objetivando também o aumento da eficiência do tratamento (JORDÃO & PESSOA, 2014).



Fonte: JORDÃO & VOLSCHAN, 2009.

Figura 3.4 - Esquema das unidades da etapa dos lodos ativados.

A tecnologia de lodo ativado convencional possui algumas características típicas que são padrão em todas as Estações de Tratamento de Esgoto. Essas características, que possuem índices per capita, estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características típicas do sistema de tratamento Lodo Ativado Convencional.

Características	Lodo ativado convencional		
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio
<b>Demanda de área (m<sup>2</sup>/hab)</b>	0,12	0,25	0,185
<b>Potência instalada (W/hab)</b>	2,5	4,5	3,5
<b>Potência consumida (kWh/hab.ano)</b>	18	26	22
<b>Custo de implantação (R\$/hab)</b>	100	160	130
<b>Custo de operação (R\$/hab.ano)</b>	10	20	15

Fonte: VON SPERLING (2008).

O sistema de lodo ativado convencional é amplamente utilizado em nível mundial. Esta unidade apresenta situações favoráveis a sua aplicação, tais como, maior eficiência de tratamento e menor área ocupada. Porém, existem algumas desvantagens, como por exemplo:

operação delicada, custo maior de operação, devido à alta utilização de energia elétrica e alta produção de massa de lodo (VON SPERLLING *et al.*, 1997).

Segundo JORDÃO & PESSOA (2014), a produção de lodo no processo de lodo ativado convencional é de aproximadamente 1,5 a 4,5 L/hab.dia e o teor de sólidos do lodo cru é em torno de 1 a 2%.

Deste modo, o lodo é um dos subprodutos gerados em estações de tratamento de esgoto que deve receber atenção especial antes de sua destinação final. O mesmo é o componente do esgoto que possui a maior parcela e importância, já que aproximadamente 0,08% do volume total do esgoto bruto é constituído de matéria sólida. Sendo assim, é indispensável, nas estações de tratamento de esgoto, algum fluxograma de tratamento da fase sólida, pois este componente do efluente doméstico deve receber tratamento adicional (JORDÃO & PESSOA, 2014).

Portanto, o lodo excedente tem grande destaque na linha de tratamento visto que este deve ser enviado ao processo de digestão para ser estabilizado, juntamente com o lodo primário que provem do decantador primário do tratamento de esgoto.

### **3.1.2 Tratamento da Fase Sólida**

Segundo VON SPERLLING (2008), o tratamento do lodo tem por objetivos, a separação dos sólidos da água, a estabilização da matéria orgânica e a redução da concentração de organismos patogênicos. A redução de umidade é alcançada nas etapas de adensamento e de desaguamento ou desidratação, enquanto a estabilização da matéria orgânica ocorre nos digestores. Estes últimos podem ainda ser aeróbios ou anaeróbios. Por fim, a remoção de organismos patogênicos, quando desejada, é alcançada em unidades específicas para este fim, como os secadores térmicos, por exemplo.

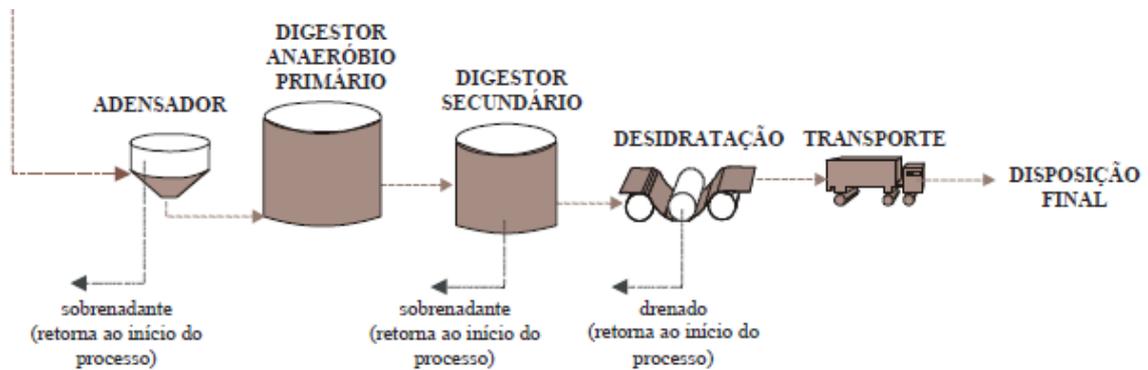
As etapas de tratamento de lodo descritas acima podem ser observadas na Tabela 3.2 e a adoção de cada uma delas e suas respectivas tecnologias é realizada em função principalmente, das características do lodo bruto gerado em cada uma das diversas etapas de tratamento da fase líquida.

Tabela 3.2 - Processos para tratamento do lodo.

Adensamento	Estabilização	Desaguamento	Higienização
Por gravidade	Digestão aeróbia e anaeróbia	Filtro prensa	Adição de cal
Por flotação	Térmica	Filtro a vácuo	Secagem térmica
Centrífugas	Estabilização química	Filtro de esteira	Compostagem
Filtros de esteira	Composto	Centrífuga	
		Leitos de secagem	

Fonte: Adaptado de JORDÃO & PESSOA, 2014.

Para melhor visualização, encontra-se apresentado na Figura 3.5 um desenho esquemático do fluxograma convencional de tratamento do lodo. Ressalta-se que a higienização não é comumente adotada e portanto não se encontra na Figura 3.5.



Fonte: ANDREOLI *et al.* (2001).

Figura 3.5 - Fluxograma convencional de tratamento de lodo.

As características do lodo a ser tratado influenciam nos processos de tratamento e disposição final, sendo que o levantamento dos dados de qualidade e quantidade do lodo a tratar é crucial para a definição do fluxograma a ser adotado no tratamento da fase sólida de uma ETE (JORDÃO & PESSOA, 2014).

E dentre todos os processos, a estabilização e a remoção da umidade podem ser consideradas as fases mais importantes para o tratamento do lodo, e, entre os processos de tratamento bioquímico do lodo, o processo de estabilização da matéria orgânica é mais comumente

utilizado (JORDÃO & PESSOA, 2014). Este tipo de processo pode ocorrer por via biológica, através da digestão aeróbia ou anaeróbia; via química, através da adição de produtos químicos; ou via térmica, com a adição de calor (CHERNICHARO, 2007).

A geração de biogás no tratamento de lodo, foco do presente trabalho, acontece na digestão anaeróbia e, portanto, maior destaque será dado a esta etapa.

A digestão anaeróbia é um processo biológico que se dá através da estabilização biológica da mistura do lodo primário com o excesso de lodo ativado e neste caso denominado lodo misto, na presença de microrganismos anaeróbios e facultativos. Essa mistura é convertida em metano e dióxido de carbono, e esse processo ocorre em reatores biológicos fechados, na ausência de oxigênio, e possui elevada produção de biogás (CHERNICHARO, 2007).

De acordo com PROSAB (1999), existem alguns fatores que têm grande influência nesse processo, tais como a temperatura, o pH, a presença de nutrientes e a ausência de materiais tóxicos no afluente. Por isso, as condições climáticas são importantes no que se refere a operação de reatores a temperatura ambiente, já que é um processo sensível a mudanças das condições ambientais. Segundo JORDÃO & PESSOA (2014), o desempenho do processo pode ser influenciado por vários fatores, tais como: baixos valores de pH, baixo teor de alcalinidade, sobrecargas de líquidos ou de sólidos, teor elevado de sólidos voláteis, presença de despejos industriais, metais e íons tóxicos, elevada frequência de variação da temperatura de projeto, adição demasiada de cal e homogeneização deficiente.

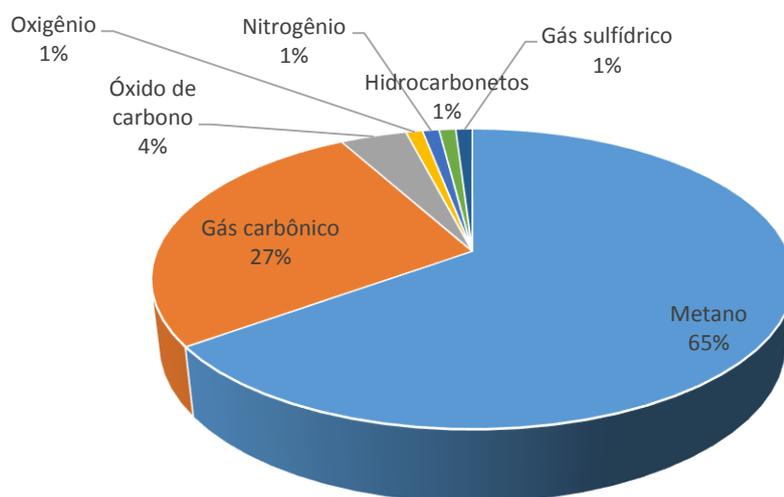
A digestão anaeróbia possui como características favoráveis o menor custo de operação, devido a não utilização de energia ou substâncias químicas auxiliares, o menor custo de implantação e a maior facilidade operacional. Além disso, a digestão anaeróbia tem também como vantagem a possibilidade de recuperação e utilização do gás metano como combustível. Entretanto, esse processo possui como principal aspecto negativo a possível emissão de odores ofensivos e de gases do efeito estufa (PROSAB, 2003).

### **3.1.3 Biogás**

De acordo com PROSAB (2003), o biogás é o gás produzido no processo de digestão anaeróbia e pode ser proveniente do tratamento do esgoto, bem como do lodo. O gerenciamento do biogás em ETEs é atividade de grande complexidade e importância, uma

vez que sua produção pode ocasionar impactos positivos ou negativos, dependendo da finalidade dada a esse subproduto do tratamento.

A produção do biogás proveniente do digestor anaeróbio está diretamente associada à alimentação de lodo bruto. Além disso, segundo ZANETTE (2009), a composição e o poder calorífico do biogás podem variar de acordo com as características do material orgânico do qual o mesmo é produzido. De acordo com a NBR 12.209/2011, o biogás é constituído majoritariamente por metano, sendo sua composição típica apresentada na Figura 3.6.



Fonte: Adaptado de JORDÃO & PESSOA, 2014.

*Figura 3.6 - Composição típica do biogás.*

O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado a concentração de metano presente. Além disso, quanto maiores forem as proporções de contaminantes na mistura que compõem o biogás, menor é o seu poder calorífico (COSTA, 2006 apud MACHADO, 2011).

Um biogás com aproximadamente 65% de metano tem o poder calorífico da ordem de 22.400kJ/m<sup>3</sup>, bem menor do que alguns gases comerciais, como observado na Tabela 3.3. Entretanto, seu uso é vantajoso e pode ter várias finalidades: geração de energia elétrica, geração de energia térmica, cogeração (geração conjunta de energia elétrica e de energia térmica) e aproveitamento como combustível para outras unidades da estação (JORDÃO & PESSOA, 2014).

*Tabela 3.3 - Poder calorífico de alguns gases.*

<b>Gás</b>	<b>Poder calorífico (kJ/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Propano comercial</b>	45.800
<b>Butano comercial</b>	44.600
<b>Gás natural</b>	37.300
<b>Metano</b>	35.800
<b>Gás da digestão (*)</b>	22.400

(\*) Admitindo 65% de metano no gás gerado no digestor.

Fonte: JORDÃO & PESSOA, 2014.

Uma estação de tratamento de lodo ativado pode consumir cerca de 250 a 400 kWh/1000m<sup>3</sup>, de acordo com o porte e a eficiência energética implantada na ETE. Assim, existe uma grande preocupação em reduzir os custos com energia.

Esquemas operacionais que diferenciem o consumo de energia ao longo do dia constituem opções que visam a redução de custos operacionais e de tarifas. Além disso, outra possibilidade para redução dos gastos é o aproveitamento energético do biogás proveniente dos digestores anaeróbios para as ETEs (JORDÃO & PESSOA, 2014). Diante disso, o biogás representa uma fonte de energia alternativa e renovável, que está sendo cada vez mais utilizada em todo o mundo (ZANETTE, 2009).

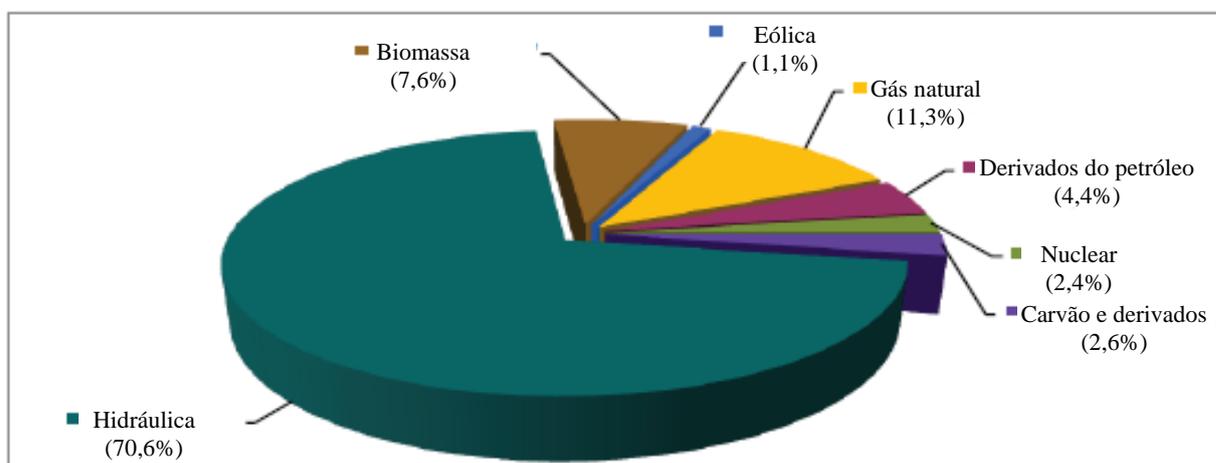
De acordo com JORDÃO & PESSOA (2014), o gás coletado tem sido utilizado para aquecimento para os prédios da estação de tratamento e para o próprio digestor. Ainda, o aproveitamento do biogás pode ser utilizado como fonte de energia para secadores térmicos de lodo e para a produção de energia utilizada na própria estação ou vendida à concessionária local de energia.

Além disso, é possível realizar o aproveitamento para veículos automotores de empresas que tratam esgoto ou produzem gás. De acordo com ZANETTE (2009), embora ainda limitado, esse uso tem apresentado interesse crescente em diversos países em função do seu grande potencial e dos diversos benefícios ambientais, especialmente a ausência de emissões de monóxido de carbono e compostos nitrogenados. Em qualquer situação, o objetivo do aproveitamento do biogás é reduzir o uso de combustíveis fósseis, e conseqüentemente, reduzir a quantidade de gases de efeito estufa lançados na atmosfera.

Em todo o mundo, questões são levantadas em relação ao suprimento futuro de energia, existindo uma busca contínua pelas fontes de energias renováveis que, em princípio, nunca se esgotarão, a exemplo da energia hidráulica, solar, eólica, das marés, geotérmica e, também, energia de materiais renováveis, como a biomassa ou a bioenergia (LOBATO, 2011).

No Brasil, o aproveitamento do biogás conta com apenas aproximadamente 13MW de potência outorgada em fase de operação; 0,6MW na fase de construção; e 1,5MW em empreendimentos com construção não iniciada (ANEEL, 2014).

De acordo com o Balanço Energético Nacional - BEN (2014), a biomassa é uma fonte que representou, no ano de 2013, 7,6% da oferta interna de energia elétrica brasileira, em relação a todas as fontes energéticas utilizadas no país (Figura 3.7). E, desse percentual, 0,53% é originário dos resíduos sólidos urbanos (Tabela 3.4). Entretanto, segundo ZANETTE (2009), pode-se acreditar que o atual aproveitamento do biogás no país encontra-se aquém do seu potencial se levada em consideração a elevada população e a sua concentração em grandes centros urbanos.



Fonte: BEN (2014).

*Figura 3.7 - Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil, ano base 2013.*

Segundo a ANEEL (2014), existem 11 usinas em operação que utilizam o biogás provenientes dos resíduos sólidos urbanos. Dentre essas, está a usina Arrudas com uma potência de 2.400kW pertencente a Companhia de Saneamento de Minas Gerais, a qual utiliza o lodo da ETE Arrudas. Segundo JORDÃO & PESSOA (2014), embora existam poucos exemplos de

casos de aproveitamento energético de ETEs brasileiras, pode-se ressaltar a implantação pioneira do sistema de cogeração da ETE Arrudas, em fins do ano de 2010.

*Tabela 3.4 - Fontes de energias por biomassa utilizadas no Brasil – Fase: Operação.*

<b>Fonte</b>	<b>Potência Outorgada (kW)</b>	<b>Potência Fiscalizada (kW)</b>	<b>%</b>
<b>Floresta</b>	2.506.157	2.305.592	19,01
<b>Resíduos sólidos urbanos</b>	70.051	66.971	0,53
<b>Resíduos animais</b>	1.199	1.199	0,01
<b>Biocombustíveis líquidos</b>	14.350	19.110	0,11
<b>Agroindustriais</b>	10.588.970	9.909.678	80,34
<b>Total</b>	13.180.727	12.302.550	100,00

Fonte: Adaptado de ANEEL (2014).

### **3.2 Gases de efeito estufa**

Gases de efeito estufa são definidos pela NBR 12.209/2011, como componente gasoso atmosférico que absorve radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra. Esses gases podem ter origem tanto natural quanto antrópica. Segundo MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA (2007), essa absorção faz com que o calor se mantenha retido próximo à superfície terrestre, garantindo assim o aquecimento da Terra e a manutenção da vida nela existente. A esse fenômeno dá-se o nome de “efeito estufa”, um fenômeno natural decorrente principalmente da presença de vapor d’água e dióxido de carbono na atmosfera. Contudo, o aumento na emissão desses gases para a atmosfera faz com que haja maior retenção de calor, causando um desequilíbrio no balanço de energia e intensificando o fenômeno do efeito estufa (BARRY E CHORLEY, 2013).

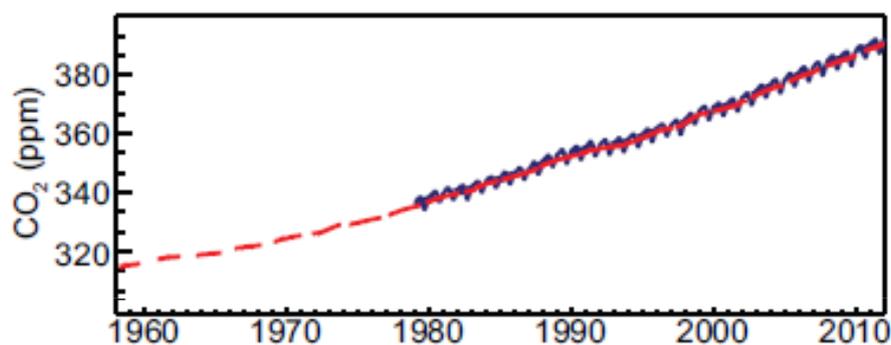
Assim, é essa intensificação que ocasiona o aquecimento global. De acordo com MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA (2007), em menos de um século, a temperatura média do planeta teve um aumento de 0,5°C. Dados recentes divulgados pelo IPCC (2013) mostram que o aumento da temperatura média global já chegou a 0,78°C, comparando-se as médias dos períodos entre 1850-1900 e entre 2003-2012. Embora numericamente esse incremento possa parecer pequeno, é muito significativo para as condições climáticas locais.

Segundo MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA (2007), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é o principal responsável pela retenção de calor na baixa atmosfera, porém, o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) também são gases causadores do efeito estufa. Vale ressaltar que isso ocorre porque tanto o CH<sub>4</sub> quanto o N<sub>2</sub>O são encontrados na atmosfera terrestre com concentrações numa ordem de grandeza de 10<sup>3</sup> vezes menor que a do CO<sub>2</sub>. Se suas concentrações aumentarem substancialmente a longo prazo, devido a seus altos potenciais de aquecimento (IPCC, 2013), terão uma maior participação no efeito estufa.

Várias linhas de pesquisa indicam que, durante as últimas décadas, a maior parte do incremento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera provem da queima de combustíveis fósseis (TANS, 2009 apud IPCC, 2013). No período de 1980 a 2011, o aumento médio anual global de CO<sub>2</sub> foi de 1,7 ppm/ano (Figura 3.8). Considerando-se o período entre 2000 e 2011 essa média passa para 2,0 ppm/ano, indicando que nos últimos anos a participação antrópica nessa emissão vem aumentando. A maior parte da variabilidade interanual observada na taxa de crescimento justifica-se por pequenas mudanças no balanço entre fotossíntese e respiração (IPCC, 2013).

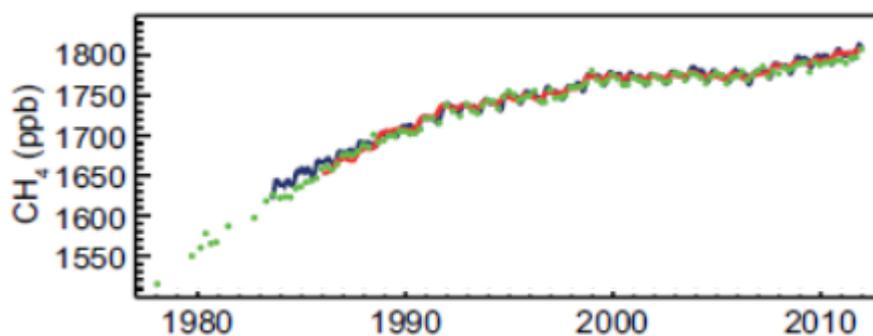
A média global da concentração de CH<sub>4</sub> em 1750 era de aproximadamente 722 ppb (ETHERIDGE *et al.*, 1998 e DLUGOKENCKY *et al.*, 2005 apud IPCC, 2013). Segundo o IPCC (2013), em 2011, essa média subiu para 1803ppb. O período de 1980 até 1998 foi caracterizado por uma taxa de crescimento decrescente. A partir de 1999, ocorreu uma estabilização dessa taxa, que permaneceu até o ano de 2006 com um aumento aproximado de 0,5 ppb/ano. Já para o período de 2007-2011, houve um aumento do metano atmosférico, passando para 6ppb/ano (Figura 3.9).

Deste modo, a emissão contínua de GEEs e o aquecimento global tem trazido crescente preocupação à comunidade científica, à medida que a degradação dos recursos naturais torna-se cada vez mais acentuada. Resultado desta conscientização foi a concepção do Protocolo de Quioto, em 1997, com a finalidade de estabilizar a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e assim frear o aquecimento global e seus possíveis impactos. O principal item desse protocolo era a redução em 5,2% das emissões pelos países industrializados, tomando-se como referência as emissões de 1990 (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007).



Fonte: IPCC (2013).

*Figura 3.8 - Média global da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. A linha vermelha representa as médias mensais das observações realizadas pelo SIO (Scripps Institution of Oceanography), e a linha azul representa as médias semanais das observações do NOAA/ESRL/GMD.*



Fonte: IPCC (2013).

*Figura 3.9 - Média global da concentração de CH<sub>4</sub> atmosférico. A linha verde representa as médias trimestrais das observações realizadas pelo UCI (medidos quatro vezes ao ano). A linha vermelha representa as médias mensais das observações do AGAGE, e a linha azul representa as médias semanais das observações do NOAA/ESRL/GMD.*

Diante desse cenário, o Brasil instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei nº 12.187/2009, que define medidas como compromisso nacional voluntário para alcançar os objetivos da PNMC. Foram adotadas ações de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, com vistas em reduzir entre 36,1% e 38,9% suas emissões projetadas até 2020.

### 3.2.1 Participação do setor de tratamento de resíduos na emissão de GEE

Os principais contribuintes para o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico são a combustão de combustíveis fósseis e do uso da terra mudanças (IPCC, 2013). Porém, o setor de tratamento de resíduos orgânicos é responsável também pela emissão de gases de efeito estufa por vários processos e níveis de tratamento distintos.

A Tabela 3.5 apresenta as emissões brasileiras de gases de efeito estufa por setor, em CO<sub>2</sub>eq (dióxido de carbono equivalente), para o período de 1990 a 2010 (MCTI, 2013). Dentro do setor de resíduos estão as emissões dos processos anaeróbios do tratamento do lodo, onde estão inseridas as ETEs avaliadas no presente estudo.

*Tabela 3.5 - Evolução das emissões de GEEs no Brasil por setor – 1990 a 2010.*

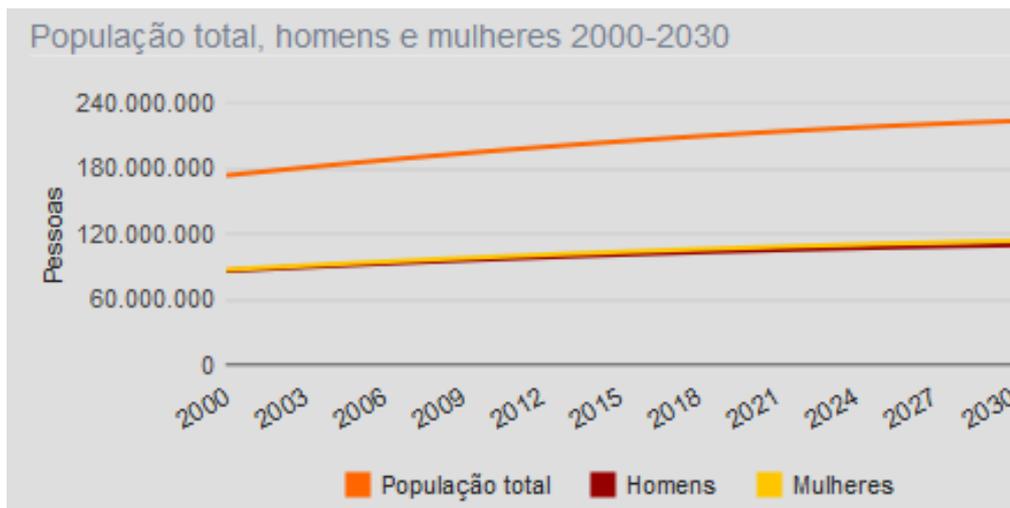
Setores	1990	1995	2000	2005	2010
	GgCO <sub>2</sub> eq				
<b>Energia</b>	191.543	232.430	301.096	328.808	399.302
<b>Processos Industriais</b>	52.536	63.065	71.673	77.943	82.048
<b>Agropecuária</b>	303.772	335.775	347.876	415.713	437.226
<b>Florestas</b>	815.965	1.950.084	1.324.371	1.167.917	279.163
<b>Resíduos</b>	28.939	33.808	38.550	41.8880	48.737
<b>TOTAL</b>	1.392.756	2.615.162	2.083.570	2.032.260	1.246.477

Gg = milhares de toneladas.

Fonte: MCTI, 2013.

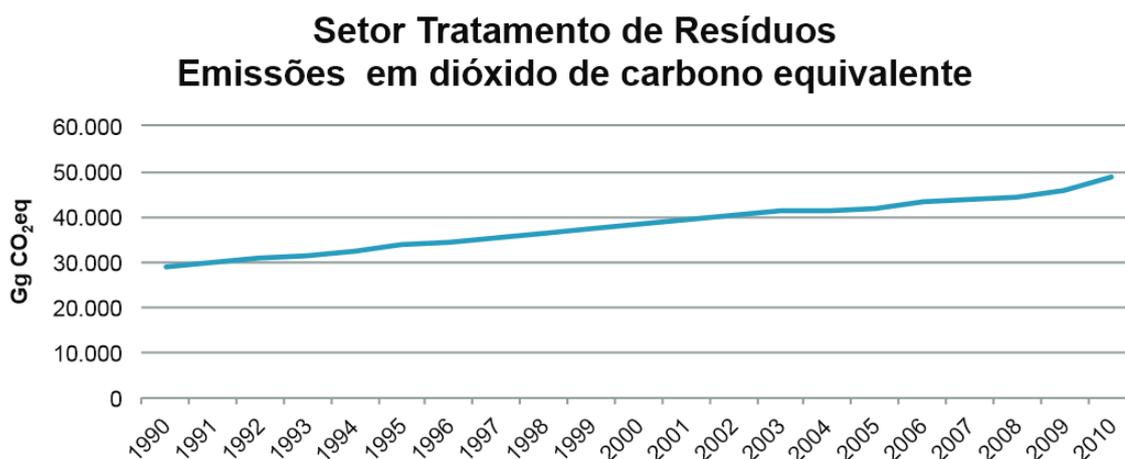
O setor de tratamento de resíduos orgânicos é constituído pela disposição de resíduos sólidos e pelo tratamento de esgotos, tanto doméstico/comercial quanto industrial, além das emissões por incineração de resíduos e pelo consumo humano de proteínas. No Brasil, este setor contribuiu com 4% das emissões brasileiras de CO<sub>2</sub>eq, no ano de 2010 (MCTI, 2013).

Segundo o MCTI (2013), as emissões da disposição de resíduos sólidos e do tratamento de esgotos domésticos tem relação direta com o aumento da população. Como o Brasil possui uma taxa positiva de crescimento da população dos últimos anos (Figura 3.10), justifica-se, entre outros fatores, o aumento das emissões de GEEs do setor de tratamento de resíduos sólidos orgânicos, como pode ser visto na Figura 3.11.



Fonte: IBGE (2014).

Figura 3.10 - Projeção de crescimento da população brasileira.



Fonte: MCTI (2013).

Figura 3.11 - Emissões do setor de tratamento de resíduos.

Ao considerar as emissões de CO<sub>2</sub>eq provenientes de sistemas de tratamento de esgoto, há duas classes principais de unidades de tratamento biológico: as unidades de tratamento aeróbio e unidades de tratamento anaeróbio. Independentemente do tratamento biológico, as reações bioquímicas são similares: compostos de carbono orgânico são oxidados e formam dióxido de carbono e/ou metano, e água (EPA, 2010). E, embora o lixo contribua com um maior percentual para as emissões de GEEs, o esgoto doméstico também tem um papel representativo nessas emissões, como pode ser visto na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Emissões de gases de efeito estufa pelo setor de tratamento de resíduos.

<b>Setor</b>	<b>1990</b>	<b>1995</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
	Gg CO <sub>2</sub> eq				
<b>Tratamento de resíduos</b>	28.939	33.808	38.550	41.880	48.737
<b>Lixo</b>	16.723	19.667	22.703	24.735	29.336
<b>Esgoto</b>	12.216	14.141	15.847	17.145	19.401
<b>Esgoto Industrial</b>	1.993	3.331	3.984	4.313	5.779
<b>Esgoto Doméstico</b>	10.223	10.810	11.864	12.831	13.622

Fonte: Adaptado de MCTI (2013).

Em vista disso, a realização do presente trabalho justifica-se pela crescente preocupação ambiental com as emissões de gases de efeito estufa das ETEs e pela possibilidade de utilização do biogás como uma possível alternativa de fonte renovável de energia, através de análise de viabilidade técnica e econômica do uso energético do biogás.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 As Estações Tratamento Esgoto Avaliadas

Segundo JORDÃO & PESSOA (2014), os processos aeróbios geram muito maior massa de lodo em comparação a processos anaeróbios. Deste modo, uma característica do lodo ativado é a alta produção de lodo, argumento importante para o presente trabalho. Assim, uma maior produção de lodo resulta numa maior produção de biogás, e conseqüentemente, numa maior geração de energia.

Para o desenvolvimento do trabalho, dados reais de operação de ETEs foram utilizados, com o objetivo de apresentar resultados mais consistentes da estimativa de geração de biogás. Pelo descrito acima, foram então adotadas ETEs para o estudo, que utilizam a tecnologia de lodo ativado.

Assim, foram contempladas catorze ETEs que estão representadas na Tabela 4.1. Esta ainda contempla dados de vazão e população, além das Companhias de Saneamento que as operam, localizadas nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e Distrito Federal.

*Tabela 4.1 – Estações de Tratamento de Esgoto e seus respectivos dados de população e de vazão.*

<b>Companhia</b>	<b>ETE</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>População (hab)</b>
<b>COPASA</b>	Arrudas	2.250,0	1.000.000
	Morro Alto*	21,0	11.340
	Vespasiano*	40,3	21.778
	Lagoa Santa*	50,6	27.297
<b>SABESP</b>	ABC	1.900,0	1.400.000
	Barueri	9.700,0	4.400.000
	Parque Novo Mundo	2.500,0	1.200.000
	São Miguel	800,0	720.000
	Suzano	800,0	720.000
<b>CEDAE</b>	Alegria*	2.500,0	1.350.000
<b>CAESB</b>	Brasília Sul*	1.193,0	644.220
	Riacho Fundo*	48,0	25.920
	Brasília Norte*	479,0	258.660
	Sobradinho*	98,0	52.920

(\*) População estimada.

Ressalta-se que os dados de vazão e população contribuinte de cada ETE, utilizados no trabalho para a estimativa de biogás gerado no tratamento do lodo em digestores anaeróbios, foram extraídos dos *websites* de cada companhia. Ainda, foi considerado, hipoteticamente, que todas as ETEs avaliadas possuem o fluxograma da fase sólida, e este é constituído por digestores anaeróbios.

Entretanto, alguns sites não disponibilizam os dados de população, apenas os de vazão. Deste modo, foi preciso estimar a população contribuinte para o sistema de tratamento de esgoto para as ETEs Morro Alto, Vespasiano, Lagoa Santa, Brasília Sul, Riacho Fundo, Brasília Norte, Sobradinho e Alegria, a partir da Equação 1.

$$P = \frac{Q}{q} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

$P$  = população estimada contribuinte de cada ETE [hab];

$Q$  = vazão média contribuinte afluenta a cada ETE [L/dia];

$q$  = vazão unitária de esgoto [L/hab.dia].

Além do consumo de água, a produção de esgotos sanitários depende também do tipo de esgoto coletado, sistema de coleta, condições climáticas, entre outros fatores. Ademais, a vazão afluenta a ETE está sujeita a variações horárias e até mesmo diárias. Assim, a população contribuinte foi então estimada em função da vazão unitária de esgoto afluenta a cada ETE avaliada, calculada a partir da Equação 2.

$$q = R \times C \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

$q$  = vazão unitária de esgoto [L/hab.dia];

$R$  = coeficiente de retorno [%];

$C$  = consumo médio de água [L/hab.dia].

Essa estimativa baseia-se no consumo médio de água de uma residência igual a 200 L/hab.dia (LEAL, 2013) e no coeficiente de retorno de água potável à rede coletora de esgoto igual a 0,80, segundo a NBR 9.649/1986. O resultado dessa equação corrobora com o dado de contribuição diária de esgoto por ocupante permanente numa residência de padrão alto igual a 160 L, apresentado pela NBR 7.229/1993.

## 4.2 Avaliação do potencial de geração de biogás

A metodologia utilizada para a avaliação do potencial de geração de biogás em ETEs e seu aproveitamento energético baseou-se nas seguintes etapas:

- a) Estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto;
- b) Estimativa da quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás;
- c) Estimativa do potencial energético do biogás e seu respectivo lucro.

A seguir, serão então descritas cada uma dessas etapas utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

### *a) Estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto*

Para a estimativa do potencial de geração de biogás das ETEs estudadas, foi utilizado o índice de geração diária de biogás por habitante igual a 25 L/hab.dia, sugerida por JORDÃO & PESSOA (2014). Segundo os mesmos autores, esse índice encontra-se no intervalo entre 25 e 30 L/hab.dia e é adotado para lodo misto (primário + secundário), nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Ainda, ressalta-se que no Brasil, é prática comum a combinação do lodo primário e do secundário nos digestores anaeróbios (JORDÃO & PESSOA, 2014).

Sendo assim, foi estimada a geração total de biogás proveniente da digestão anaeróbia para cada uma das ETEs, a partir da Equação 3.

$$B_{total} = P_{percapita} \times P \times 0,001 \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo:

$$B_{total} = \text{produção total de biogás [m}^3\text{/dia]}$$

$P_{percapita}$  = produção de biogás per capita para lodo misto [L/hab.dia]

$P$  = população (dados estimados ou encontrados) [hab]

Conforme já mencionado, a origem dos dados de população utilizados na Equação 1 para cada umas das ETEs são as seguintes: para Arrudas, ABC, Barueri, Parque Novo Mundo, São Miguel e Suzano, os dados foram extraídos dos sites das Companhias que as operam; para as demais, a população contribuinte foi estimada.

***b) Estimativa da quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás***

Após a estimativa da produção de biogás, foi possível calcular a produção de gás metano e dióxido de carbono presentes no biogás. Esses gases, como já mencionado anteriormente, representam um percentual de aproximadamente 65% e 27% na constituição do biogás, respectivamente. Assim, com base nessas concentrações, foi estimado a produção do CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, em kg/ano, através das Equações 4 e 5, respectivamente. Esses cálculos foram realizados com base no balanço de massa, e foi considerado para os mesmos, que o volume do gás é de 0,02271 m<sup>3</sup>/mol na CNTP e que a massa molar do metano é de 0,016 kg/mol e a do dióxido de carbono é de 0,044 kg/mol.

$$CH_{4volume} = (B_{total} \times 65\% \times 365dias \times MM_{ch4}) / Vol_{gás} \quad (4)$$

$$CO_{2volume} = (B_{total} \times 27\% \times 365dias \times MM_{CO2}) / Vol_{gás} \quad (5)$$

Sendo:

$CH_{4volume}$  = produção do gás metano [kg/ano]

$CO_{2volume}$  = produção do gás dióxido de carbono [kg/ano]

$B_{total}$  = produção total de biogás [m<sup>3</sup>/dia]

$MM_{CH4}$  = massa molar do metano [kg/mol]

$MM_{CO2}$  = massa molar do dióxido de carbono [kg/mol]

$Vol_{gás}$  = volume do gás nas condições CNTP [m<sup>3</sup>/mol].

*c) Estimativa do potencial energético do biogás e seu respectivo lucro*

Para a estimativa da energia produzida anualmente a partir da utilização do biogás proveniente do lodo resultante dos processos anaeróbios (Equação 6), considerou-se o parâmetro  $A_{energético}$ , igual a 15 kWh/hab.ano, valor sugerido por JORDÃO & PESSOA (2014).

$$E_{prod} = A_{energético} \times P \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo:

$E_{prod}$  = energia produzida a partir do biogás [kWh/ano]

$A_{energético}$  = aproveitamento do poder calorífico do gás da digestão [kWh/hab.ano]

$P$  = população [hab].

Visto que a tarifa média anual no Brasil, para o ano de 2014, é de R\$268,00/MWh, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2014), pode-se também estimar o lucro equivalente da energia produzida a partir da produção de biogás, através da Equação 7.

$$L_{anual} = E_{prod} \times (\text{R}\$268,00/\text{MWh}) \times 0,001 \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo:

$L_{anual}$  = lucro equivalente da energia produzida [R\$/ano]

$E_{prod}$  = energia produzida a partir do biogás [kWh/ano].

Ainda, foi possível calcular alguns índices para cada um dos sistemas de tratamento de Lodos Ativados Convencionais das ETEs em análise, conforme dados de população e de características típicas do Lodo Ativado Convencional. Essas características são: potência per capita consumida anualmente (valor médio igual a 22kWh/hab.ano) e custo per capita de operação por ano (valor médio igual a R\$15/hab.ano), como exposto anteriormente. Assim,

utilizaram-se os valores médios de cada índice para cálculo da potência consumida e do custo de operação.

Com essas informações, realizou-se uma comparação entre a energia consumida pelo sistema de Lodo Ativado Convencional e a energia produzida a partir do biogás proveniente do digestor anaeróbio. Além disso, pôde-se verificar se o sistema de conversão de biogás em energia é autossuficiente ou não, na perspectiva econômica.

### **4.3 Estimativa dos gases de efeito estufa segundo metodologia estabelecida pelo IPCC**

O metano proveniente dos efluentes domésticos pode ser calculado através da metodologia indicada pelo *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC, 2006), para Tratamento e Despejos de Águas Residuárias. A fim de calcular o metano gerado no tratamento anaeróbio do lodo, foi feita uma adaptação desta metodologia (IPCC, 2006).

Nos cálculos foram utilizadas as mesmas ETEs do item anterior, e seus respectivos dados de população. A utilização dessa metodologia objetivou a estimativa da quantidade de metano lançada na atmosfera pelos digestores anaeróbios das estações de tratamento avaliadas, a fim de poder comparar estes resultados com os resultados anteriormente obtidos.

Assim, para o cálculo das emissões de metano provenientes da digestão anaeróbia do lodo, utilizou-se a Equação 8.

$$CH_4_{Emissions} = [\sum_{i,j} (U_i \times T_{i,j} \times EF_j)](TOW - S) - R \quad (\text{Eq. 8})$$

Sendo:

$CH_4_{Emissions}$  = emissões de metano no ano do inventário [kgCH<sub>4</sub>/ano]

$U_i$  = fração da população na faixa de renda  $i$  no ano do inventário

$T_{i,j}$  = grau de utilização do tipo de tratamento para cada fração da população

$EF_j$  = fator de emissão do metano [kgCH<sub>4</sub>/kgDBO]

$i$  = grupos de renda (rural e urbana)

$j$  = tipos de tratamento

$TOW$  = conteúdo total de matéria orgânica nos efluentes domésticos no ano do inventário [kgDBO/ano]

$S$  = matéria orgânica convertida em esgoto no ano do inventário [kgDBO/ano]

$R$  = quantidade de  $CH_4$  recuperado no ano do inventário [kg $CH_4$ /ano].

As emissões de  $CH_4$  a partir do tratamento de águas residuárias variam de país para país, dependendo da tecnologia de tratamento e das práticas de gestão adotadas, bem como das características das águas residuárias e dos métodos de estimativa. Para esse cálculo, foi considerado para o parâmetro  $U_i$  o valor igual a 1, pois a fração da população contribuinte das ETEs avaliadas no presente é totalmente urbana. Ainda, considerou-se também para o parâmetro  $T_{i,j}$  o valor igual a 1, visto que o dado populacional utilizado equivale ao valor integral do número de habitantes que contribuem para o sistema de tratamento. Ou seja, os dados disponibilizados nos *websites* correspondem ao total da população contribuinte.

Além disso, considerou-se como 90% a eficiência do sistema de tratamento. Assim, na equação 8 substituiu-se  $(TOW - S)$  por  $S$  igualando-o a 90%, a fim de representar a quantidade de lodo que ficou no sistema, já que o objetivo deste trabalho é estimar a emissão de metano proveniente do lodo que segue para a linha de tratamento. Ressalta-se que trata-se de uma adaptação da metodologia estabelecida pelo IPCC (2006), visto que o cálculo original seria a estimativa da emissão de metano proveniente do tratamento do efluente líquido. Também definiu-se o valor do parâmetro  $R$  igual a zero, já que o objetivo foi determinar a emissão total de metano lançado na atmosfera.

Com a finalidade de se obter o fator de emissão para o processo de digestão anaeróbia do lodo utilizou-se a Equação 9. Assim, de acordo com o IPCC (2006), para o tipo de tratamento em questão – digestão anaeróbia do lodo –, o valor de  $MCF_j$  é igual a 0,8 e o valor de  $B_o$  é igual a 0,6 kg $CH_4$ /kgDBO.

$$EF_j = B_o \times MCF_j \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo:

$EF_j$  = fator de emissão [kg $CH_4$ /kgDBO]

$B_o$  = capacidade máxima de produção de  $CH_4$  a partir de uma determinada quantidade de compostos orgânicos [ $kgCH_4/kgDBO$ ]

$MCF_j$  = fator de correção de metano – indicação do grau de anaerobiose.

Por último, para a estimativa do conteúdo total de matéria orgânica no esgoto, resultante dos efluentes domésticos, utilizou-se a Equação 10. Para tal, adotou-se o valor de 54 g/hab.dia para o parâmetro de DBO no Brasil (JORDÃO & PESSOA, 2014).

$$TOW = P \times DBO \times 0,001 \times I \times 365 \quad (\text{Eq. 10})$$

Sendo:

$TOW$  = conteúdo total de matéria orgânica nos efluentes domésticos no ano do inventário [ $kgDBO/ano$ ]

$P$  = população no ano do inventário [hab]

$DBO$  = contribuição per capita de DBO [g/hab.dia]

$I$  = fator de correção para DBO de efluentes industriais despejados nos esgotos.

Segundo recomendações do IPCC (2006), adotou-se o valor do fator de correção igual a 1,00, uma vez que a metodologia considera o parâmetro igual a 1,00 quando os efluentes industriais não são coletados, e igual a 1,25 quando os efluentes industriais são recolhidos.

#### **4.4 Estimativa das emissões de $CO_2$ e $CH_4$ segundo metodologia estabelecida pelo EPA**

Segundo a *Environmental Protection Agency* (EPA, 2010), sistemas de tratamento aeróbio produzem principalmente  $CO_2$ , enquanto os sistemas anaeróbios produzem tanto  $CO_2$  quanto  $CH_4$ . Assim, utilizou-se também a metodologia estabelecida pelo EPA para o cálculo das emissões dos gases de efeito estufa -  $CO_2$  e  $CH_4$  - provenientes das unidades de tratamento biológico das ETEs analisadas.

Essa metodologia fornece um meio geral de estimar as emissões desses gases de ambos os tipos de processos de tratamento. Porém, considerou-se apenas as emissões provenientes do processo de tratamento anaeróbio, utilizando as Equações 11 e 12.

$$CO_2 = 10^{-6} \times Q_{ww} \times OD \times Eff_{OD} \times CF_{CO_2} \times [\lambda(1 - MCF_s \times BG_{CH_4})] \quad (11)$$

$$CH_4 = 10^{-6} \times Q_{ww} \times OD \times Eff_{OD} \times CF_{CH_4} \times [\lambda(MCF_s \times BG_{CH_4})] \quad (12)$$

Sendo:

$CO_2$  = taxa de emissão de  $CO_2$  [Mg/h]

$CH_4$  = taxa de emissão de  $CH_4$  [Mg/h]

$10^{-6}$  = unidades de fator de conversão [Mg/g]

$Q_{ww}$  = vazão de esgoto afluente [ $m^3/h$ ]

$OD$  = demanda de oxigênio dos esgotos afluentes à unidade de tratamento biológico, ou seja, concentração de DBO no lodo do esgoto [mg/L ou  $g/m^3$ ]

$Eff_{OD}$  = eficiência de remoção de DBO na unidade de tratamento biológico

$CF_{CO_2}$  = fator de conversão para a geração máxima de  $CO_2$  por demanda de oxigênio [ $44/32 = 1,375g CO_2/g$  demanda de oxigênio]

$CF_{CH_4}$  = fator de conversão para a geração máxima de  $CH_4$  por demanda de oxigênio [ $16/32 = 0,5 g CH_4 / g$  demanda de oxigênio]

$MCF_s$  = fator de correção de metano para o lodo do digestor (indica a fração da demanda de oxigênio que é digerida no digestor por processo anaeróbio)

$BG_{CH_4}$  = fração de carbono na forma de  $CH_4$  no biogás gerado

$\lambda$  = rendimento de biomassa [g carbono convertido em biomassa/ g carbono consumida no efluente no processo de tratamento].

Segundo recomendações da EPA (2010), utiliza-se o valor padrão igual a 0,65 para o parâmetro  $BG_{CH_4}$  e para o parâmetro  $MCF_s$  utiliza-se o valor de 0,8 na digestão anaeróbia do lodo. Além disso, foi considerado para o parâmetro de  $OD$  o valor de 500mg/L, e o valor de

95% para o parâmetro  $Eff_{OD}$ , segundo recomendações do EPA, mesmo que seja prática comum no Brasil a adoção de 300mg/L para concentração de DBO. Ainda, para o parâmetro  $\lambda$  foi utilizado o valor padrão igual a 0,65, segundo recomendação da EPA para processos de digestão anaeróbia do lodo.

#### 4.5 Determinação do dióxido de carbono equivalente segundo metodologia estabelecida pelo EPA

Para fazer a comparação entre os efeitos atmosféricos de vários gases de efeito estufa utiliza-se, usualmente, a métrica do potencial de aquecimento global (*Global Warning Potential – GWP*). Deste modo, é preciso calcular o dióxido de carbono equivalente ( $CO_{2eq}$ ), uma unidade comum, em que todos os GEEs são representados com o potencial de aquecimento do  $CO_2$ . A Tabela 4.2 apresenta os valores correspondentes para o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e metano ( $CH_4$ ), gases presentes majoritariamente no biogás provenientes de processos anaeróbios.

Tabela 4.2 - Potencial de Aquecimento Global para alguns gases de efeito estufa.

Gás	Símbolo	GWP
<b>Dióxido de carbono</b>	$CO_2$	1
<b>Metano</b>	$CH_4$	21

Fonte: EPA (2010).

Assim, para efeito de comparação utilizou-se a Equação 13 a fim de estimar o dióxido de carbono equivalente, de acordo com o documento de orientação técnica do EPA (2010).

$$CO_{2eq} = \sum_{i=1}^n (GHG_i \times GWP_i) \quad (13)$$

Sendo:

$CO_{2eq}$  = emissões em equivalentes de dióxido de carbono [toneladas por ano]

$GHG_i$  = emissões por cada GEE [toneladas por ano]

$GWP_i$  = GWP do respectivo GEE (Tabela 4.2)

$n$  = número de GEE emitidos a partir da fonte.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Avaliação do potencial de geração de biogás

Esse tópico apresenta a estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto das ETEs avaliadas, e suas consequentes emissões dos gases de efeito estufa, além da estimativa do potencial energético do biogás e também o lucro obtido por essa energia renovável. Para essa metodologia, os resultados serão apresentados de acordo com as etapas descritas no item 4.2 (página 25).

#### a) Estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto

Para avaliação do potencial de geração de biogás, foi estimado a produção diária de biogás em cada uma das ETEs avaliadas. Os resultados encontrados estão reunidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Estimativa da produção diária de biogás para cada uma das ETEs avaliadas.

Companhia de Saneamento	ETE	Vazão (L/s)	População (hab)	Biogás (m <sup>3</sup> /dia)
COPASA	Arrudas	2.250,0	1.000.000	25.000,0
	Morro Alto*	21,0	11.340	283,5
	Vespasiano*	40,3	21.778	544,5
	Lagoa Santa*	50,6	27.297	682,4
SABESP	ABC	1.900,0	1.400.000	35.000,0
	Barueri	9.700,0	4.400.000	110.000,0
	Parque Novo Mundo	2.500,0	1.200.000	30.000,0
	São Miguel	800,0	720.000	18.000,0
	Suzano	800,0	720.000	18.000,0
CEDAE	Alegria*	2.500,0	1.350.000	33.750,0
	Brasília Sul*	1.193,0	644.220	16.105,5
CAESB	Riacho Fundo*	48,0	25.920	648,0
	Brasília Norte*	479,0	258.660	6.466,5
	Sobradinho*	98,0	52.920	1.323,0
<b>TOTAL</b>				<b>295.803,0</b>

(\*) População estimada.

Sabe-se que a geração de biogás é diretamente proporcional ao número de habitantes atendidos pela ETE, ou seja, a vazão afluyente de esgoto. Assim, as ETEs que apresentam uma maior vazão a ser tratada, possuem uma maior geração de biogás.

Ressalta-se que os cálculos com base na geração de biogás por massa de SVT (sólidos voláteis totais) destruídos são mais confiáveis, e devem ser priorizados nos balanços energéticos. Entretanto, foram utilizados os cálculos com base no dado populacional, pois o foco do trabalho é fazer apenas uma estimativa da produção de biogás, e segundo JORDÃO & PESSOA (2014), os mesmos podem ser usados como indicador inicial.

***b) Estimativa da quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás***

A partir dos resultados encontrados para a geração de biogás, foi possível também estimar a produção de metano e de dióxido de carbono originários das ETEs avaliadas. A Tabela 5.2 apresenta as estimativas da geração anual de metano e dióxido de carbono para as ETEs avaliadas, considerando-se que o biogás possui 65% de metano em sua composição e 27% de dióxido de carbono, conforme já mencionado. Para fins de comparação, as emissões desses gases foram transformadas em unidade de kg/ano, considerando os gases nas condições normais de temperatura e pressão, através de balanço de massa.

*Tabela 5.2- Estimativa da geração anual de metano e dióxido de carbono presente no biogás gerado em volume e em massa.*

<b>Companhia de Saneamento</b>	<b>ETE</b>	<b>m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ano</b>	<b>m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>/ano</b>	<b>kg CH<sub>4</sub>/ano</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/ano</b>
<b>COPASA</b>	Arrudas	5.931.250,0	2.463.750,0	4.178.775,9	4.773.447,8
	Morro Alto	67.260,4	27.938,9	47.387,3	54.130,9
	Vespasiano	129.171,9	53.656,0	91.006,2	103.957,1
	Lagoa Santa	161.905,3	67.253,0	114.068,0	130.300,8
<b>SABESP</b>	ABC	8.303.750,0	3.449.250,0	5.850.286,2	6.682.826,9
	Barueri	26.097.500,0	10.840.500,0	18.386.613,8	21.003.170,4
	P. Novo Mundo	7.117.500,0	2.956.500,0	5.014.531,0	5.728.137,4
	São Miguel	4.270.500,0	1.773.900,0	3.008.718,6	3.436.882,4
<b>CEDAE</b>	Suzano	4.270.500,0	1.773.900,0	3.008.718,6	3.436.882,4
	Alegria	8.007.187,5	3.326.062,5	5.641.347,4	6.444.154,6
<b>CAESB</b>	Brasília Sul	3.821.029,9	1.587.197,0	2.692.051,0	3.075.150,5
	Riacho Fundo	153.738,0	63.860,4	108.313,9	123.727,8
	Brasília Norte	1.534.177,1	637.273,6	1.080.882,2	1.234.700,0
	Sobradinho	313.881,8	130.381,7	221.140,8	252.610,9
<b>TOTAL</b>		<b>70.179.351,9</b>	<b>29.151.423,1</b>	<b>49.443.841,1</b>	<b>56.480.079,9</b>

A partir dos resultados encontrados, pode-se observar que, apesar da produção volumétrica de metano ser substancialmente maior que a do dióxido de carbono, a produção em massa de dióxido de carbono ultrapassa, mesmo que insignificadamente, a produção em massa de metano.

Ainda, ressalta-se que os cálculos consideraram uma condição de produção de biogás contínua. Grandes variações são esperadas no período de inverno ou em outra situação inesperada, tais como: o despejo de esgoto industrial junto com o esgoto doméstico e altas contribuições pluviométricas nas galerias de esgoto.

*c) Estimativa do potencial energético do biogás e seu respectivo lucro*

Para uma possível comparação do custo de operação de uma ETE que possui a tecnologia de lodo ativado, foram calculados alguns índices das estações avaliadas. Os resultados para os cálculos de potência consumida e custo de operação estão reunidos na Tabela 5.3.

*Tabela 5.3 - Cálculo de índices das ETEs avaliadas constituintes da tecnologia de lodo ativado.*

<b>Companhia de Saneamento</b>	<b>ETE</b>	<b>Energia elétrica consumida (kWh/ano)</b>	<b>Custo operação (R\$/ano)</b>
<b>COPASA</b>	Arrudas	22.000.000	15.000.000,00
	Morro Alto	249.480	170.100,00
	Vespasiano	479.120	326.673,00
	Lagoa Santa	600.534	409.455,00
<b>SABESP</b>	ABC	30.800.000	21.000.000,00
	Barueri	96.800.000	66.000.000,00
	Parque Novo Mundo	26.400.000	18.000.000,00
	São Miguel	15.840.000	10.800.000,00
	Suzano	15.840.000	10.800.000,00
<b>CEDAE</b>	Alegria	29.700.000	20.250.000,00
<b>CAESB</b>	Brasília Sul	14.172.840	9.663.300,00
	Riacho Fundo	570.240	388.800,00
	Brasília Norte	5.690.520	3.879.900,00
	Sobradinho	1.164.240	793.800,00
<b>TOTAL</b>		260.306.974,4	177.482.028,00

Como já mencionado anteriormente, estações que possuem a tecnologia de lodo ativado possuem elevados gastos com energia elétrica, justificando o alto custo de operação. Assim, a

fim de avaliar o custo-benefício do aproveitamento da geração total de biogás, foi estimado também seu potencial energético e o lucro obtido através da utilização do biogás produzido nos digestores anaeróbios presentes nas ETEs avaliadas. Os resultados encontram-se reunidos na Tabela 5.4. A partir disso, pôde-se fazer uma análise comparativa entre o custo anual de operação e o lucro anual proveniente do biogás.

*Tabela 5.4 - Estimativa da energia bruta produzida anualmente a partir do biogás.*

<b>Companhia de Saneamento</b>	<b>ETE</b>	<b>População (hab)</b>	<b>Energia bruta produzida (kWh/ano)</b>	<b>Lucro (R\$/ano)</b>
<b>COPASA</b>	Arrudas	1.000.000	15.000.000,0	4.020.000,00
	Morro Alto*	11.340	170.100,0	45.586,80
	Vespasiano*	21.778	326.673,0	87.548,36
	Lagoa Santa*	27.297	409.455,0	109.733,94
<b>SABESP</b>	ABC	1.400.000	21.000.000,0	5.628.000,00
	Barueri	4.400.000	66.000.000,0	17.688.000,00
	P. Novo Mundo	1.200.000	18.000.000,0	4.824.000,00
	São Miguel	720.000	10.800.000,0	2.894.400,00
<b>CEDAE</b>	Suzano	720.000	10.800.000,0	2.894.400,00
	Alegria*	1.350.000	20.250.000,0	5.427.000,00
<b>CAESB</b>	Brasília Sul*	644.220	9.663.300,0	2.589.764,40
	Riacho Fundo*	25.920	388.800,0	104.198,40
	Brasília Norte*	258.660	3.879.900,0	1.039.813,20
	Sobradinho*	52.920	793.800,0	212.738,40
<b>TOTAL</b>		11.832.135	177.482.028,0	47.565.183,50

(\*) População estimada.

Portanto, a energia total estimada para todas as ETEs através da produção de biogás foi superior a 150 milhões kWh por ano. Segundo EPE (2013), o consumo residencial médio no Brasil, referente ao ano de 2012, é de 158,9 kWh/mês, e o consumo per capita igual a 2.545 kWh/ano. Sendo assim, considerando o dado de consumo per capita e os resultados estimados no presente trabalho, constatou-se que essa quantidade de energia total gerada em todas as ETEs poderia suprir a necessidade de uma população de aproximadamente 70.000 habitantes, ou seja, o equivalente a uma cidade de pequeno porte.

Embora a disponibilidade de energia represente uma parcela menor que a potência consumida, ela poderá ser eventualmente usada para atender a fase de aeração biológica nas tecnologias de lodo ativado presente nas ETEs avaliadas, ou a recirculação do lodo no próprio digestor, e

ainda como energia calorífica. Esses resultados estão reunidos na Tabela 5.5, e também encontram-se apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2, como forma de melhor visualização dos resultados.

*Tabela 5.5 - Valores de potência consumida e produzida e valores de custo operacional e lucro obtido através do aproveitamento do biogás.*

<b>ETE</b>	<b>Potência consumida (kWh/ano)</b>	<b>Potência produzida (kWh/ano)</b>	<b>Custo operação (R\$/ano)</b>	<b>Lucro (R\$/ano)</b>
<b>Arrudas</b>	22.000.000	15.000.000	15.000.000,00	4.020.000,00
<b>Morro Alto</b>	249.480	170.100	170.100,00	45.586,80
<b>Vespasiano</b>	479.120	326.673	326.673,00	87.548,36
<b>Lagoa Santa</b>	600.534	409.455	409.455,00	109.733,94
<b>ABC</b>	30.800.000	21.000.000	21.000.000,00	5.628.000,00
<b>Barueri</b>	96.800.000	66.000.000	66.000.000,00	17.688.000,00
<b>P. Novo Mundo</b>	26.400.000	18.000.000	18.000.000,00	4.824.000,00
<b>São Miguel</b>	15.840.000	10.800.000	10.800.000,00	2.894.400,00
<b>Suzano</b>	15.840.000	10.800.000	10.800.000,00	2.894.400,00
<b>Alegria</b>	29.700.000	20.250.000	20.250.000,00	5.427.000,00
<b>Brasília Sul</b>	14.172.840	9.663.300	9.663.300,00	2.589.764,40
<b>Riacho Fundo</b>	570.240	388.800	388.800,00	104.198,40
<b>Brasília Norte</b>	5.690.520	3.879.900	3.879.900,00	1.039.813,20
<b>Sobradinho</b>	1.164.240	793.800	793.800,00	212.738,40
<b>TOTAL</b>	260.306.974	177.482.028	177.482.028,00	47.565.183,50

Segundo JORDÃO & PESSOA (2014), geralmente a energia disponibilizada pelo aproveitamento do biogás não atende o total do consumo da ETE, mas a mesma poderá suprir parte da sua demanda. Corroborando com essa afirmação, os resultados encontrados para a potência produzida correspondem a aproximadamente 68% da potência consumida nas ETES avaliadas no presente estudo. Além disso, de acordo com os mesmos autores, a sua efetiva utilização é mais aplicável em ETES de maior porte. E segundo ZANETTE (2009), em geral, o aproveitamento do biogás é viável em estações de tratamento de efluentes com digestão anaeróbia do lodo que atendem a uma população superior a 200.000 habitantes. Ainda este limite poderá ser inferior quando for possível o aproveitamento do calor ou quando forem utilizados processos anaeróbios para o tratamento dos efluentes.

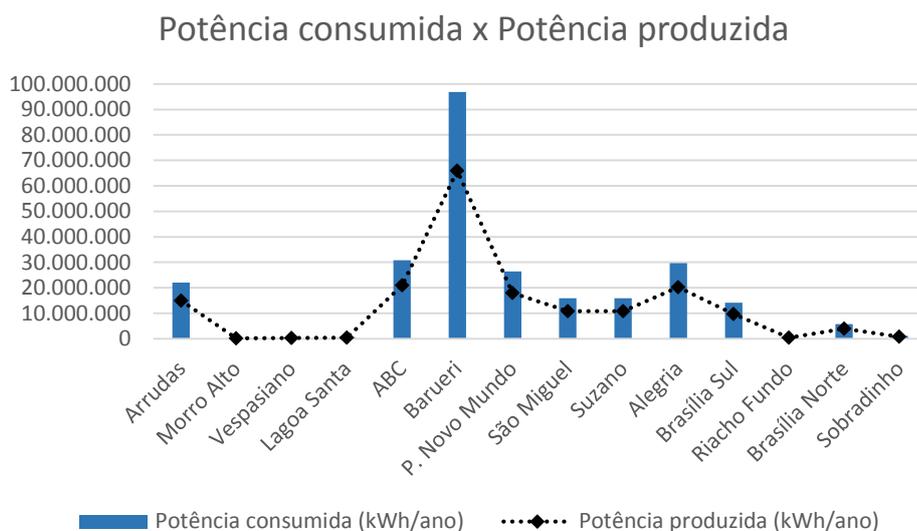


Figura 5.1 - Valores de potência consumida e produzida obtida através do aproveitamento do biogás.

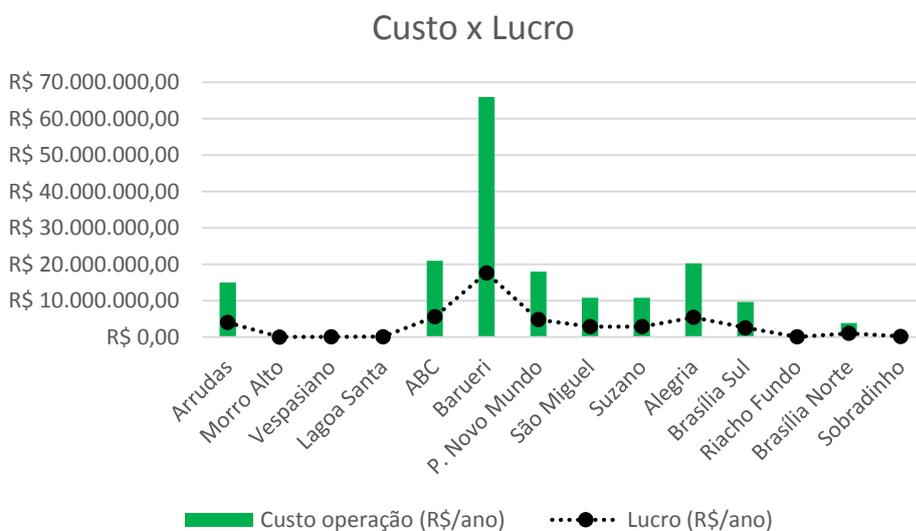


Figura 5.2 - Valores custo operacional e lucro obtido através do aproveitamento do biogás.

Assim, na avaliação da viabilidade econômica dos projetos devem-se ponderar inicialmente os custos de investimento, operação e manutenção para cada projeto específico e as receitas obtidas com a venda de energia ou a redução de custos proporcionada.

Visto que alguns equipamentos e produtos específicos são importados, o custo para a implantação de um sistema de aproveitamento energético do biogás deve ser levado em conta. Assim, o investimento inicial pode ser considerado elevado, o que impacta nos custos de

capital dos projetos, além do alto custo das tecnologias de geração de energia elétrica (MACHADO, 2011). Ainda, os investimentos em energia renovável apresentam, em sua maioria, custos superiores aos necessários para a adoção de fontes tradicionais (MMA, 2010).

Entretanto, no Brasil, investimentos na geração de energia que se utiliza do biogás como fonte combustível podem ser viáveis economicamente devido à apropriação de receitas oriundas da venda da energia elétrica e da comercialização dos créditos de carbono (MMA, 2010). Além do mais, segundo JORDÃO & PESSOA (2014), deve-se considerar principalmente o benefício ambiental da eliminação dos gases do efeito estufa, já que no Brasil a energia é relativamente barata.

Assim, um maior investimento no aproveitamento energético do biogás das ETEs é essencial, pois significa menor custo de energia elétrica e menor emissão de GEEs para a atmosfera, além de conferir um perfil sustentável às empresas de saneamento. Deste modo, a adoção do método de utilização do biogás no país deve ser precedida de estudos para obtenção de tecnologias aprimoradas, respaldadas em instrumentos jurídicos, institucionais e econômicos, possibilitando assim o surgimento de novos projetos eficazes no aproveitamento energético a partir de esgoto doméstico.

## **5.2 Estimativa dos gases de efeito estufa segundo metodologia estabelecida pelo IPCC**

Esse capítulo apresenta a estimativa da geração de metano segundo metodologia estabelecida pelo IPCC (2006). A Tabela 5.6 apresenta os resultados encontrados para a geração anual do gás metano proveniente do processo de digestão anaeróbia dos lodos das ETEs avaliadas neste trabalho.

A metodologia em questão, estabelecida pelo IPCC, não dispõe de ferramentas para cálculos de estimativa de geração de dióxido de carbono. Assim, foi possível fazer apenas a estimativa da geração do gás metano proveniente dos digestores anaeróbios das ETEs estudadas.

Tabela 5.6 - Estimativa da geração anual do gás metano segundo metodologia estabelecida pelo IPCC.

<b>Companhia de Saneamento</b>	<b>ETE</b>	<b>População (hab)</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>kg CH<sub>4</sub>/ano</b>
<b>COPASA</b>	Arrudas	1.000.000	2.250,0	8.514.720,0
	Morro Alto*	11.340	21,0	96.556,9
	Vespasiano*	21.778	40,3	185.435,3
	Lagoa Santa*	27.297	50,6	232.426,3
<b>SABESP</b>	ABC	1.400.000	1.900,0	11.920.608,0
	Barueri	4.400.000	9.700,0	37.464.768,0
	Parque Novo Mundo	1.200.000	2.500,0	10.217.664,0
	São Miguel	720.000	800,0	6.130.598,4
<b>CEDAE</b>	Suzano	720.000	800,0	6.130.598,4
	Alegria*	1.350.000	2.500,0	11.494.872,0
<b>CAESB</b>	Brasília Sul*	644.220	1.193,0	5.485.352,9
	Riacho Fundo*	25.920	48,0	220.701,5
	Brasília Norte*	258.660	479,0	2.202.417,5
	Sobradinho*	52.920	98,0	450.599,0
<b>TOTAL</b>				100.747.318,2

(\*) População estimada.

### 5.3 Estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> segundo metodologia estabelecida pelo EPA

Neste capítulo, foi avaliada a geração dos gases dióxido de carbono e metano segundo metodologia estabelecida pelo EPA (2010). Os resultados encontrados das estimativas de emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> estão reunidos na Tabela 5.7.

Convergindo da mesma maneira que a metodologia do item 5.1, os resultados encontrados nessa etapa também mostram que, apesar do metano ter um maior percentual volumétrico na composição do biogás, sua emissão em unidade de kg/ano é menor do que o dióxido de carbono. Além disso, a presente metodologia obteve resultados para a emissão de dióxido de carbono bastante elevados – mais que 50% – em comparação as emissões de metano.

Tabela 5.7 - Estimativa das emissões anuais de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> segundo metodologia estabelecida pelo EPA.

Companhia de Saneamento	ETE	População (hab)	Vazão (L/s)	kg CH <sub>4</sub> /ano	kg CO <sub>2</sub> /ano
COPASA	Arrudas	1.000.000	2.250,0	5.695.992,9	14.459.058,9
	Morro Alto*	11.340	21,0	53.162,6	134.951,2
	Vespasiano*	21.778	40,3	102.097,5	259.170,6
	Lagoa Santa*	27.297	50,6	127.970,0	324.846,9
SABESP	ABC	1.400.000	1.900,0	4.809.949,6	12.209.872,0
	Barueri	4.400.000	9.700,0	24.556.058,3	62.334.609,5
	P. Novo Mundo	1.200.000	2.500,0	6.328.881,0	16.065.621,0
	São Miguel	720.000	800,0	2.025.241,9	5.140.998,7
	Suzano	720.000	800,0	2.025.241,9	5.140.998,7
CEDAE	Alegria*	1.350.000	2.500,0	6.328.881,0	16.065.621,0
	Brasília Sul*	644.220	1.193,0	3.020.142,0	7.666.514,3
CAESB	Riacho Fundo*	25.920	48,0	121.514,5	308.459,9
	Brasília Norte*	258.660	479,0	1.212.613,6	3.078.173,0
	Sobradinho*	52.920	98,0	248.092,1	629.772,3
<b>TOTAL</b>				<b>56.655.838,9</b>	<b>143.818.668,0</b>

(\*) População estimada.

#### 5.4 Determinação do dióxido de carbono equivalente segundo metodologia estabelecida pelo EPA

Para fins de comparação, as emissões dos GEEs encontradas nesse trabalho foram convertidas para a mesma métrica – dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq). Segundo metodologia do EPA (2010), foi utilizado o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* – GWP) como fator de ponderação, para se chegar à unidade comum de carbono equivalente.

Assim, os resultados encontrados foram obtidos através de cálculos que utilizaram os valores estimados para a geração dos gases metano e dióxido de carbono para ambas as metodologias. A Tabela 5.8 apresenta as emissões de dióxido de carbono equivalente estimadas nesse trabalho (convertidas para a unidade comum).

Ressalta-se ainda que, embora o presente trabalho tenha utilizado a metodologia do IPCC para estimar a emissão do gás metano, não foi calculado o CO<sub>2</sub>eq para a mesma, pois essa metodologia não permite o cálculo para o gás dióxido de carbono.

Tabela 5.8 - Valores estimados convertidos para unidade comum - Dióxido de carbono equivalente.

<b>Companhia de Saneamento</b>	<b>ETE</b>	<b>Metodologia Jordão &amp; Pessoa (tonCO<sub>2</sub>eq/ano)</b>	<b>Metodologia EPA (tonCO<sub>2</sub>eq/ano)</b>
<b>COPASA</b>	Arrudas	92.527,7	134.074,9
	Morro Alto	1.049,3	1.251,4
	Vespasiano	2.015,1	2.403,2
	Lagoa Santa	2.525,7	3.012,2
<b>SABESP</b>	ABC	129.538,8	113.218,8
	Barueri	407.122,1	578.011,8
	P. Novo Mundo	111.033,3	148.972,1
	São Miguel	66.620,0	47.671,1
	Suzano	66.620,0	47.671,1
<b>CEDAE</b>	Alegria	124.912,5	148.972,1
<b>CAESB</b>	Brasília Sul	59.608,2	71.089,5
	Riacho Fundo	2.398,3	2.860,3
	Brasília Norte	23.933,2	28.543,1
	Sobradinho	4.896,6	5.839,7
<b>TOTAL</b>		1.094.800,7	1.333.591,3

Através da avaliação dos resultados encontrados, pode-se observar que os valores para a emissão de dióxido de carbono equivalente convergem na mesma ordem de grandeza entre as metodologias.

Em comparação com outros setores que também contribuem para o aquecimento global, as emissões brasileiras de gases de efeito estufa não são muito significativas, como pode ser observado na Figura 5.3.

Entretanto, mesmo que a emissão de GEEs originários do setor de tratamento de resíduos não seja tão expressiva em vista aos demais setores, essa contribuição para a atmosfera teve um aumento de 2% em 5 anos (Figura 5.4). Admitindo-se que esse incremento da emissão dos GEEs por esse setor é devido ao aumento da população brasileira e, o consequente aumento da produção de resíduos sólidos, conclui-se que sua participação nas emissões só tende a aumentar.

Sendo assim, é evidente que o aproveitamento do biogás é uma medida para frear a contribuição de lançamento de GEEs para a atmosfera. Portanto, esse aproveitamento pode ser considerado como um grande benefício ambiental para a questão do aquecimento global.

Como já dito anteriormente, apesar de os resíduos sólidos urbanos contribuírem com um maior percentual das emissões de CO<sub>2</sub>eq, o esgoto doméstico também tem uma parcela de influência nas emissões do setor de tratamento de resíduos juntamente com os efluentes industriais.

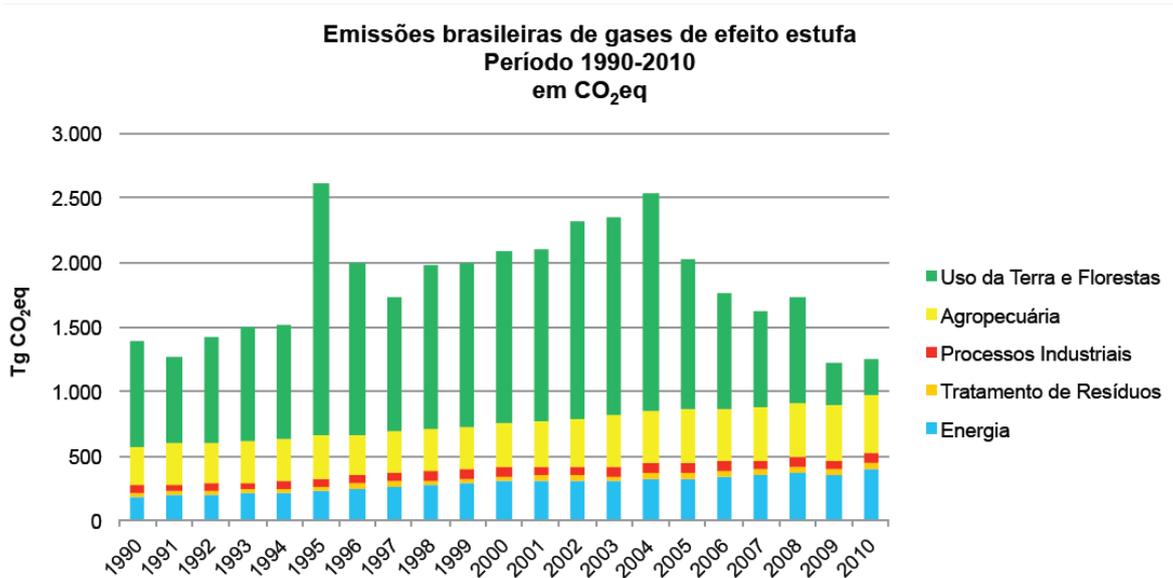


Figura 5.3 - Emissões brasileiras de gases de efeito estufa no período 1990-2010 em CO<sub>2</sub>eq.

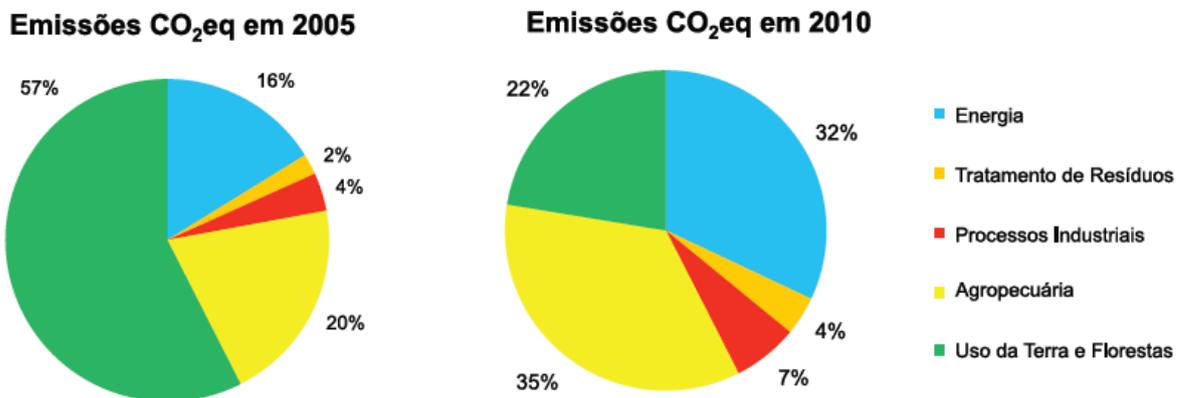


Figura 5.4 - Variação da participação de cada setor, de 2005 para 2010.

No Brasil, o fato da população encontrar-se concentrada em grandes centros urbanos contribui para o significativo potencial de produção de biogás em aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes. Nos aterros sanitários, o potencial de produção de metano pode chegar a  $15,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}$ , enquanto nas estações de tratamento de efluentes este potencial é de até  $7,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}$ , considerando a universalização dos serviços de coleta e tratamento de efluentes e disposição dos resíduos sólidos urbanos (ZANETTE, 2009).

## 5.5 Análise comparativa entre os resultados

Para avaliar as três metodologias empregadas nesse trabalho, foi feita uma análise comparativa dos resultados encontrados para a geração de metano entre ambas. Estes estão apresentados na Tabela 5.9.

Os resultados mostram que as metodologias de Jordão & Pessoa (2014) e da EPA (2010) convergem, estando ambas na mesma ordem grandeza, possuindo uma diferença na emissão total de metano de aproximadamente 13%. Ainda, a metodologia do IPCC (2006) diverge destas, com uma diferença na emissão total de 51% e 44%, respectivamente.

*Tabela 5.9 - Valores encontrados para a geração de metano nas três metodologias utilizadas.*

Companhia de Saneamento	ETE	Metodologia Jordão & Pessoa (kgCH <sub>4</sub> /ano)	Metodologia IPCC (kgCH <sub>4</sub> /ano)	Metodologia EPA (kgCH <sub>4</sub> /ano)
COPASA	Arrudas	4.178.775,9	8.514.720,0	5.695.992,9
	Morro Alto	47.387,3	96.556,9	53.162,6
	Vespasiano	91.006,2	185.435,3	102.097,5
	Lagoa Santa	114.068,0	232.426,3	127.970,0
SABESP	ABC	5.850.286,2	11.920.608,0	4.809.949,6
	Barueri	18.386.613,8	37.464.768,0	24.556.058,3
	Parque Novo Mundo	5.014.531,0	10.217.664,0	6.328.881,0
	São Miguel	3.008.718,6	6.130.598,4	2.025.241,9
CEDAE	Suzano	3.008.718,6	6.130.598,4	2.025.241,9
	Alegria	5.641.347,4	11.494.872,0	6.328.881,0
CAESB	Brasília Sul	2.692.051,0	5.485.352,9	3.020.142,0
	Riacho Fundo	108.313,9	220.701,5	121.514,5
	Brasília Norte	1.080.882,2	2.202.417,5	1.212.613,6
	Sobradinho	221.140,8	450.599,0	248.092,1
<b>TOTAL</b>		<b>49.443.841,1</b>	<b>100.747.318,2</b>	<b>56.655.838,9</b>

Pode-se destacar o trabalho de MACHADO (2011) que apresenta informações de três ETEs utilizadas no presente estudo. A primeira é a ETE Barueri que apresenta dados de vazão de esgoto afluente igual a  $9,4\text{m}^3/\text{s}$  e vazão de biogás gerado de  $22.000\text{m}^3/\text{dia}$ , além do fornecimento de energia de  $1.600\text{MWh}/\text{mês}$ , isto é, aproximadamente  $20\text{GWh}/\text{ano}$ .

A segunda ETE é a Alegria que, segundo MACHADO (2011), possui uma vazão de esgoto afluente de  $1,9\text{m}^3/\text{s}$  e uma vazão de biogás de  $210\text{m}^3/\text{h}$  (medida no dia 28/07/2008). De acordo com o mesmo autor, a ETE Alegria utiliza a energia produzida para energizar a iluminação monumental dos digestores, além de ser usada 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.

A outra ETE estudada por MACHADO (2011) foi a ETE Arrudas pertencente à COPASA, que é projetada para tratar uma vazão média de  $2,25\text{m}^3/\text{s}$ . Segundo JORDÃO & PESSOA (2014), embora poucos são os exemplos de casos reais no Brasil, pode-se ressaltar a implantação pioneira do sistema de cogeração de energia da ETE Arrudas, em fins do ano de 2010. Outra consideração a ser feita é que, segundo dados da COPASA (2010), a ETE Arrudas opera uma vazão de esgoto afluente de  $2.260\text{L}/\text{s}$  e possui um potencial de geração de energia de  $1.044,1\text{kWh}/\text{h}$ . O potencial encontrado no presente trabalho para a ETE Arrudas foi de  $1.712\text{kWh}/\text{h}$ , divergindo em 39% no valor real para o estimado.

Comparou-se os resultados encontrados para a emissão de metano nas três metodologias utilizadas no presente trabalho com os dados apresentados para cinco ETEs no trabalho de ZANETTE (2009), ETEs essas também avaliadas no presente estudo. Segundo o autor, as informações contidas no trabalho foram obtidas a partir da SABESP, CEDAE e COPASA.

Para fins de comparação, foram utilizados os dados de entrada (vazão e população) do trabalho de ZANETTE (2009), e foram calculadas as emissões de metano através das três metodologias descritas neste trabalho. A partir daí, foi possível comparar os dados de emissão de metano fornecidos por este autor e os estimados no presente trabalho (Tabela 5.10).

Os resultados apresentados na Tabela 5.10 mostraram que a variação entre os valores de ZANETTE (2009) e os valores para a primeira metodologia (Jordão & Pessoa, 2010) apresentou divergência média de aproximadamente 30%. A variação entre o autor e a segunda metodologia utilizada (IPCC, 2006) apresentou uma flutuação média de aproximadamente 40% a menos do previsto por ZANETTE (2009). Essa maior variação pode ser justificada pela adaptação ao método estabelecido pelo IPCC (2006).

Por fim, a variação encontrada entre os resultados estimados pela terceira metodologia (EPA, 2010) e os dados apresentados pelo autor teve uma flutuação em torno de 13%. Entretanto, para a ETE Alegria e Arrudas essa flutuação diferenciou das demais, com uma variação de -37% e 3%, respectivamente.

*Tabela 5.10 – Valores de emissão de metano encontrados pelas três metodologias utilizadas e dados apresentados no trabalho de ZANETTE (2009).*

<b>ETE</b>	<b>População (hab)</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>Metodologia Jordão &amp; Pessoa (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/dia)</b>	<b>Metodologia IPCC (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/dia)</b>	<b>Metodologia EPA (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/dia)</b>
<b>ABC</b>	1.400.000	3	34.000	22.750	46.356	29.533
<b>Barueri</b>	4.400.000	9,5	107.000	71.500	145.689	93.522
<b>São Miguel</b>	720.000	1,5	17.000	11.700	23.840	14.767
<b>Suzano</b>	720.000	1,5	17.000	11.700	23.840	14.767
<b>Alegria</b>	1.500.000	5	36.000	24.375	49.667	49.222
<b>Arrudas</b>	1.000.000	1,8	48.000	16.250	33.111	17.720

## 6. CONCLUSÕES

Nas estações de tratamento de esgoto, algumas unidades que utilizam processos biológicos anaeróbios geram biogás composto principalmente por gás metano e dióxido de carbono. Visto que o biogás produzido no tratamento de lodo em digestores anaeróbios tem maior potencial calorífico em comparação com o biogás produzido em reatores UASB, este pode ser utilizado como fonte de energia. Sendo assim, o biogás pode ser considerado uma fonte renovável e economicamente atrativa, pois além de possibilitar a diversificação da matriz energética, proporciona redução do uso dos recursos naturais esgotáveis. Fora a vantagem estratégica desse tipo de energia, visto que as ETEs estão localizadas nos grandes centros urbanos, diminuindo, assim, a necessidade de investimento em infraestrutura para o transporte da energia nos locais de consumo.

As ETEs que possuem a tecnologia de lodo ativado possuem um alto custo de operação devido aos elevados gastos com energia elétrica. Assim, o aproveitamento energético do biogás é interessante para essas estações, visto que a energia gerada pode ser utilizada na aeração da fase biológica do tratamento. Constatou-se que, em relação ao potencial energético estimado no presente trabalho para todas as ETEs avaliadas, é possível suprir parte da demanda de energia elétrica da própria estação ou até mesmo abastecer uma cidade de 70.000 habitantes por consequência da recuperação do biogás.

Assim, ressalta-se que, embora a geração de energia elétrica equivale a uma parte da energia consumida nos processos, ou seja, não torna a ETE autossuficiente em energia, o aproveitamento energético a partir do biogás é benéfico por vários motivos: diminuição da energia comprada da concessionária local; possibilidade de utilização do biogás para a geração de energia térmica e o aproveitamento do calor gerado para o aquecimento dos próprios biodigestores (cogeração); possibilidade de venda do excedente de energia, com vistas ao valor da tarifa e o preço de venda à concessionária; obtenção e comercialização de créditos de carbono.

Em relação ao valor total estimado para a geração de metano proveniente do lodo de esgoto das ETEs avaliadas, pôde-se perceber que as três metodologias estudadas apresentaram resultados na mesma ordem de grandeza. Além disso, os valores estimados no presente trabalho e os valores comparados com ZANETTE (2009) também se encontraram na mesma ordem de grandeza. Entretanto, os resultados encontrados para a metodologia estabelecida pelo IPCC desviaram um pouco além das demais. Essa divergência pode ser explicada pela

adaptação do método original que foi realizada no presente estudo para cálculo das emissões de GEEs de lodo de esgoto.

Foi constatado também que a população total de mais de 11 milhões de habitantes pertencentes a todas ETEs avaliadas no presente trabalho contribui com a emissão de mais de 1 milhão de toneladas de CO<sub>2eq</sub> anualmente.

Destaca-se que, mesmo que a participação das emissões de GEEs dos resíduos sólidos urbanos seja maior que a do tratamento de lodo, este ainda tem um papel fundamental no setor de tratamento de resíduos. Observa-se que ainda, o setor de tratamento de resíduos orgânicos possui uma participação crescente nos últimos anos. Sendo assim, é fundamental a necessidade de estudos de viabilidade técnica e econômica para o uso do biogás tanto em aterros sanitários quanto em Estações de Tratamento de Esgoto.

É importante destacar que o biogás seja utilizado de forma conservadora como combustível para a produção de energia. Ou seja, a fim de obter uma maior segurança energética, o mesmo deve ser utilizado como combustível complementar. Ainda, recomenda-se que cada estação interessada em implementar o sistema de aproveitamento energético do biogás, faça também os cálculos com base na geração de biogás por massa de SVT destruídos, pois são mais confiáveis, como dito anteriormente.

O aproveitamento energético do biogás promove a utilização ou reaproveitamento de recursos renováveis; colabora com a não dependência de fonte de energia fóssil; aumenta a oferta e possibilita a geração descentralizada de energia próxima aos centros de carga; e promove economia no processo de tratamento de esgoto, aumentando a viabilidade da implantação de serviços de saneamento básico. Nesse sentido, as tecnologias de digestão anaeróbia e de aproveitamento do biogás têm-se revelado eficazes no tratamento e valorização de resíduos e na mitigação do efeito estufa, evitando custos ambientais correspondentes ao uso de fontes convencionais de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.FERNANDES, F.; Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. Vol. 6 /2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, n. I).

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Fontes de energia. Banco de informações de Geração. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>>. Acesso em: 14 de novembro de 2014.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Relatórios tarifa média. Disponível em:

<[http://relatorios.aneel.gov.br/\\_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampRegCC.xlsx&Source=http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx&DefaultItemOpen=1](http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampRegCC.xlsx&Source=http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx&DefaultItemOpen=1)>. Acesso em: 13 de novembro de 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. 1993.

BARRY, R.G; CHORLEY, R.R. *Atmosfera, Tempo e Clima*. 9ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BEN. Balanço Energético Nacional – ano base 2013. Ministério de Minas e Energia, 2014.

Disponível em: < [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2014.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf)>. Acesso em: 22 de agosto de 2014.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. *Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências*.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009. *Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências*.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria MS nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011. *Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.*

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. *Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.*

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011. *Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.*

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 274 de 25 de janeiro de 2000. *Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras.*

CAESB. Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Disponível em: <<http://www.caesb.df.gov.br/esgoto/conheca-as-unidades.html>>. Acesso em 21 de janeiro de 2014.

CEDAE. Companhia Estadual de Águas e Esgotos. Disponível em: <<http://www.cedae.com.br/>>. Acesso em 21 de janeiro de 2014.

CHERNICHARO, C. A. L.; Reatores Anaeróbios. Vol. 5. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, n. I).

COPASA. Companhia de Saneamento de Minas Gerais. Disponível em:<<http://www.copasa.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=160>>. Acesso em: 21 janeiro de 2014.

COPASA. Companhia de Saneamento de Minas Gerais. Potencial Energético das Estações de Tratamento de Esgoto. 2010. Disponível em: <[http://www.ahk.org.br/upload\\_arq/1Apresenta%C3%A7%C3%A3o\\_COPASA\\_maio\\_2010\\_vs.pdf](http://www.ahk.org.br/upload_arq/1Apresenta%C3%A7%C3%A3o_COPASA_maio_2010_vs.pdf)>. Acesso em 5 de novembro de 2014.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Ministério de Minas e Energia. Rio De Janeiro. 2013. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf)>. Acesso em: 22 de agosto de 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em 20 de novembro de 2014.

IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: *Waste*. 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>>. Acesso em: 9 de abril de 2014.

IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2013 IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Chapters 2: Observations: Atmosphere and Surface. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_Chapter02\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter02_FINAL.pdf)>. Acesso em: 9 de novembro de 2014.

JORDÃO, E.P e PESSÔA, C.A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 7ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

JORDÃO, E.P; VOLSCHAN JR., I. Tratamento de esgotos em empreendimentos habitacionais. Brasília: CAIXA, 2009.

LEAL, F.C.T. Apostila de Sistemas de Esgotamento Sanitário Urbano e Rural. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2ª Edição, 2013.

LOBATO, L. C. S. Aproveitamento Energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

MACHADO, L. L. N. 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.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://gvces.com.br/arquivos/177/EstimativasClima.pdf> >. Acesso em: 28 de maio de 2014.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. Ed: Oficina de textos. São Paulo, 2007.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. Produto 6: Resumo Executivo. Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando

incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável. São Paulo, 2010.

Disponível em:

<[http://www.mma.gov.br/estruturas/164/\\_publicacao/164\\_publicacao10012011033201.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf)>.

Acesso em 01 de dezembro de 2014.

PNSB, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. 2008. Disponível em:

<[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB\\_2008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf)>. Acesso em: 25 de junho de 2014.

PROSAB, Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro – RJ. 1999.

Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/prosabcamposfinal.pdf>>. Acesso em: 11 de novembro de 2014.

PROSAB, Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Vitória – ES. 2003. Disponível em:

<<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/ProsabStulio.pdf>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2014.

SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em:

<<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=104>>. Acesso em: 12 out. 2013.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos serviços de água e esgoto. Brasília, 2011. Disponível em:

<<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=101>>. Acesso em: 14 de novembro de 2014.

USEPA, U.S. *Environmental Protection Agency*. 2010. Disponível em:

<[http://www.epa.gov/ttn/chief/efpac/ghg/GHG\\_Biogenic\\_Report\\_draft\\_Dec1410.pdf](http://www.epa.gov/ttn/chief/efpac/ghg/GHG_Biogenic_Report_draft_Dec1410.pdf)>.

Acesso em 14 de novembro de 2014.

VON SPERLING, M. Lodos Ativados. Vol. 4. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2008. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, n. I).

VON SPERLING, M.; VAN HAANDEL, A.C.; JORDÃO, E.P.; CAMPOS, J.R.; CYBIS, L. F.; AISSE, M. M.; SOBRINHO, P. A. Capítulo 5 do Livro PROSAB/ 1997. Disponível em:

<<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/ProsabCarlos/Cap-5.pdf>>. Acesso em: 01 de outubro de 2014

ZANETTE, A. L., Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <[http://ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/zanette\\_luiz.pdf](http://ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/zanette_luiz.pdf)>. Acesso em 13 de novembro de 2014.

ZILOTTI, H. A. R.; Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2012. Disponível em: <[http://200.201.88.199/portalpos/media/File/energia\\_agricultura/pdf/Dissertacao\\_Helcio\\_A\\_Zilotti.pdf](http://200.201.88.199/portalpos/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Helcio_A_Zilotti.pdf)>. Acesso em 10 de novembro de 2014.