

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO  
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO EM REATORES ANAERÓBIOS

Mariana Furlan Pratti

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro (SP)

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

MARIANA FURLAN PRATTI

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA  
A PARTIR DO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO EM  
REATORES ANAERÓBIOS

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP  
2016

604.6 Pratti, Mariana  
P913a Avaliação do potencial de produção de energia a partir do  
tratamento de esgoto sanitário em reatores anaeróbios /  
Mariana Pratti. - Rio Claro, 2016  
47 f. : il., figs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia ambiental) -  
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas

Orientador: Marcelo Loureiro Garcia

1. Resíduos. 2. Biogás. 3. Recuperação de energia. 4.  
Metano. I. Título.

MARIANA FURLAN PRATTI

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A  
PARTIR DO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO EM  
REATORES ANAERÓBIOS

Trabalho de Formatura apresentado  
ao Instituto de Geociências e Ciências  
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista Júlio  
de Mesquita Filho, para obtenção do  
grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Marcelo Loureiro Garcia

Clauciana Schmidt Bueno de Moraes

Erich Shen Higa Lee

Rio Claro, 16 de junho de 2016.

Mariana Furlan Pratti

Marcelo Loureiro Garcia

Dedico este trabalho a todos que, de alguma forma, acendem minha luz interior e me fazem acreditar no pensamento positivo, no amor e em um mundo melhor.

## AGRADECIMENTOS

À UNESP e ao corpo docente da Engenharia Ambiental por todo o conhecimento, aprendizado e vivência proporcionados;

Ao Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia por toda confiança, paciência e auxílio como orientador, educador e pessoa;

Aos meus amigos e amigas da Escola da Vila, do Colégio Santa Cruz, da universidade, do Projeto TAMAR e do mundo afora pelas conversas, risadas, aprendizados e momentos de descontração;

À minha família, por todo suporte, amor e, mais do que tudo, por me incentivarem a seguir meus sonhos;

Ao Erik, pelo amor, carinho e companhia, sempre.

*“Somos o que fazemos, mas somos,  
principalmente, o que fazemos para mudar o que  
somos.”*

(Eduardo Galeano)

## RESUMO

A crise energética e, a conseqüente busca por fontes alternativas e sustentáveis de energia que contribuem para a manutenção da qualidade ambiental, torna o biogás uma fonte em potencial, visto seu elevado teor de metano. Nesse contexto, o objetivo central deste trabalho é verificar o potencial de geração de energia e a viabilidade de do aproveitamento energético do biogás, gerado no tratamento de esgoto sanitário em reatores anaeróbios. A metodologia se baseou em uma revisão bibliográfica que permitiu o levantamento de um banco de dados representativo a respeito dos valores de demanda química de oxigênio, carga orgânica volumétrica e demais parâmetros de entrada nos reatores. Estes, quando necessário, foram padronizados para as condições mesofílicas de tratamento ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) e, utilizados para obtenção dos valores teóricos (ideais) e reais (oriundos de procedimentos experimentais) de rendimento, produção volumétrica e por fim, de potencial energético do metano que compõe o principal resultado deste trabalho. O potencial energético médio obtido foi da ordem de 12.000 kWh/dia, valor que representa 5% do total de energia gerado em Itaipu no ano de 2015 e garante o atendimento de, aproximadamente, 2.400 residências padrões brasileiras. Desta forma, em virtude do baixo número de residências atendidas e do total de quilowatts gerados, em um primeiro momento, a recuperação de energia do biogás não parece promissora. No entanto, considerando que o Brasil apresenta condições climáticas favoráveis para a operação dos sistemas anaeróbios com baixo consumo de energia, é possível afirmar que, a energia gerada pela recuperação de energia do biogás garante a autonomia energética da planta, condição já verificada pela Estação de Tratamento de Esgoto Ouro Verde, em Foz de Iguaçu. Assim, este trabalho, nos permite concluir que hoje o aproveitamento energético do metano em escala real é viável sendo, no entanto, necessários esforços nos âmbitos acadêmicos, científicos e políticos de modo que tecnologias mais eficientes sejam desenvolvidas, contribuindo para que o montante de energia gerado seja cada vez maior e, permita a promoção de incentivos a esta tecnologia. Assim, a geração de energia de forma limpa e sustentável se torna atrativa e associada a condições adequadas de saneamento, reduzindo as emissões de metano na atmosfera e minimizando o efeito estufa.

**Palavras-chave:** Biogás, Reatores anaeróbios, Esgoto sanitário, Energia.



## ABSTRACT

The crisis of the energy and the consequent search for alternative and sustainable sources of energy that contribute to environmental quality maintenance, make the biogas a potential source of energy due to its high contents of methane. Hence, in this context, the main objective of this work is to highlight the potential of energy generation derived from the biogas generated in the treatment of domestic sewage in anaerobic reactors. The methodology was based on a literature review that allowed to establish a representative database regarding the chemical oxygen demand, the organic loading rate and other input parameters of the reactors. These, when necessary, were standardized to the so called mesophilic treatment conditions ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) and used to determine the theoretical (ideal) and real values (derived from experimental procedures) of methane yield, methane volumetric production and finally, methane energetic potential that makes up the main result. The average value obtained for energy potential was approximately 12,000 kWh/day, which represents about 5 % of the total energy generated at Itaipu in 2015, making it possible to serve approximately 2,400 Brazilian medium class houses. Due to the low number of serviced residences and total kilowatts generated, at the first glance, the biogas energy recovery does not seem promising. However, considering that Brazil has favorable climatic conditions for the operation of anaerobic systems with low power consumption, it can be said that the energy generated by the biogas energy recovery ensures energy autonomy to the plant, condition already verified by the treatment plant of Ouro Verde, at Foz do Iguaçu. That experiment allows us to say that the energy use of methane in real scale is quite feasible, being, however, necessary efforts in the academic, scientific and political spheres in such way that more efficient technologies can be developed to take full advantage of this type of energy. This is a very promising way of generating power from a clean and sustainable manner, mainly when combined with adequate sanitary conditions, reducing methane emissions to the atmosphere, thus minimizing the greenhouse effect.

**Key-words:** Biogas, Anaerobic reactors, Sanitary sewage, energy.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

CASAN - Companhia Catarinense de Águas e Saneamento.

CePTS - Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

COMGAS - Companhia de Gás de São Paulo.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

COP – Conferência das Partes.

COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais.

COV ou OLR – Carga orgânica volumétrica ou *organic loading rate*.

CREs - Certificados de redução de emissões.

CRUSP - Conjunto Residencial da Universidade de São Paulo.

DBO – Demanda bioquímica de oxigênio.

DQO ou COD – Demanda química de oxigênio ou *chemical oxygen demand*.

ETA – Estação de tratamento de água.

ETE – Estação de tratamento de esgoto.

FBP – Filtro biológico percolador.

GEEs – Gases do efeito estufa.

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* ou Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.

MDL – Mecanismos de desenvolvimento limpo.

OMM - Organização Meteorológica Mundial.

PCI – Poder calorífico inferior.

PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná.

UASB – *Upflow anaerobic blanket reactor* ou reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo.

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo.

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais.

USP – Universidade de São Paulo.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
2.1 Objetivos gerais.....	14
2.2 Objetivos específicos .....	14
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
3.1 Panorama do saneamento nacional .....	15
3.2 Os sistemas de tratamento de esgotos sanitários.....	16
3.3 O tratamento anaeróbio .....	17
3.3.1 <i>Etapas metabólicas da digestão anaeróbia</i> .....	18
3.4 O biogás .....	22
3.4.1 <i>O potencial energético do biogás</i> .....	23
3.5 Mudanças climáticas .....	24
3.5.1 <i>O Protocolo de Kyoto</i> .....	25
3.5.2 <i>Os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo</i> .....	26
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Durante milhares de anos, a biomassa foi responsável por atender à maior parte das necessidades energéticas da humanidade e, a partir do século XIX, seu uso nos países industrializados começou a diminuir com o início da era dos combustíveis fósseis (KLAS, 1998 apud ZANETTE, 2009), paradigma este que perdura até hoje e sob o qual está alicerçada parte majoritária das atividades produtivas do homem.

No entanto, na década de 1970, com a crise energética, novos meios de produção de energia começaram a ser empregados, embasados em incentivos políticos, econômicos e nos avanços tecnológicos que buscam uma solução que permita a manutenção dos padrões produtivos e a mitigação ou eliminação dos impactos ambientais.

A biomassa, definida como todo recurso não renovável oriundo de materiais orgânicos que podem ser empregados como fonte de energia, ressurge então como uma fonte potencial em crescimento (GENOVESE et al., 2006 apud ZILOTTI, 2012) e que, segundo a ANEEL (2006), é atualmente uma alternativa importante e difundida para a produção de energia elétrica e térmica para os países em desenvolvimento.

Nesse cenário, ganham destaque os processos anaeróbios; processos biológicos naturais, que ocorrem na ausência de oxigênio livre, no qual a matéria orgânica vegetal ou animal é convertida, por meio da atividade de diversas populações de microrganismos, em uma mistura gasosa denominada biogás.

O biogás apresenta em sua composição típica 60% de metano ( $\text{CH}_4$ ), 35% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e 5% de uma mistura de hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ), ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), aminas voláteis e oxigênio ( $\text{O}_2$ ) (SOUZA et al, 2005; COELHO et al, 2006 apud ZILOTTI, 2012) e, vem sendo estudado por diversos autores. Isso porque, com o seu aproveitamento para obtenção de energia elétrica, o metano ( $\text{CH}_4$ ) é queimado e liberado na forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), cujo potencial de poluição do meio ambiente é aproximadamente 24 vezes inferior ao do metano no que se refere ao efeito estufa (COELHO et al, 2006).

Assim, pode-se dizer que, o interesse pelos processos do tratamento anaeróbios se deve, no geral, ao potencial de aplicação do gás metano, associado à adequação ambiental dos

efluentes tratados (Kennedy; Droste, 1986; Ni; Naveau; Nyns, 1993; Borzacconi; Lopez; Vinas, 1995; Seghezze et al, 1998; Rajeshwari et al, 2000; Nishio; Nakashimada, 2007; Khanal, 2008 apud Fuess, 2012).

A determinação da eficiência e a efetiva viabilidade de aproveitamento do biogás como fonte de energia pode contribuir para o incentivo do uso dessas técnicas em diferentes reatores anaeróbios de modo a verificar sua real taxa custo/benefício. Adicionalmente, trabalhos como os aqui apresentados podem contribuir para romper as barreiras regulatórias, institucionais, econômicas e tecnológicas que dificultam ainda hoje o efetivo aproveitamento desta fonte de energia no Brasil.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos gerais

O presente trabalho busca verificar o potencial de geração de energia e os ganhos ambientais envolvidos a partir do aproveitamento energético do metano presente no biogás gerado pelo tratamento de esgotos sanitários em reatores anaeróbios, buscando-se atestar se a recuperação de energia a partir de esgotos sanitários é uma alternativa a ser considerada e incentivada em âmbito nacional.

### 2.2 Objetivos específicos

Para a realização do objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Comparar os valores teóricos calculados com os valores reais reportados pelos autores, de modo a se averiguar a eficiência dos processos de recuperação de energia;
- Analisar os valores reais de potencial energético do biogás e compreender sua magnitude no que tange a produção de energia;
- Verificar a viabilidade do aproveitamento energético do biogás no contexto nacional atual.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Panorama do saneamento nacional

O saneamento, segundo o Instituto Trata Brasil (2013), pode ser entendido como o conjunto de medidas que busca preservar ou alterar as condições do meio ambiente e garantir a promoção da saúde, prevenindo doenças e melhorando a qualidade de vida da população. Na prática, se constitui como um conjunto de serviços e instalações, assegurado pela Constituição, que garante o abastecimento de água, esgotamento sanitário, drenagem urbana, bem como coleta e gestão dos resíduos sólidos urbanos.

No entanto, segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento (PNSB, 2008), 55,2% dos municípios brasileiros tinham serviço de esgotamento sanitário por rede coletora, tendo sido pouco significativa a evolução referente à pesquisa anterior (PNSB, 2000), que registrava 52,2%. Além disso, é importante ressaltar que a estatística de acesso à rede coletora de esgoto contabiliza 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 recolhido, é tratado (PNSB, 2008).

Como consequência, de acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2010), tem-se um cenário onde a poluição dos recursos hídricos causada pela carência de saneamento e, pelo lançamento do esgoto *in natura* está entre as causas majoritárias de poluição dos corpos d'água e da proliferação de doenças. Fica evidente a necessidade de se reverter o quadro sanitário supracitado, mediante pesquisas e ações conjuntas que envolvam os setores públicos, privados e a sociedade civil como um todo, de forma a fomentar discussões, gerar mecanismos legais cada vez mais rigorosos e viabilizar novas tecnologias atrativas para prevenção e mitigação dos impactos negativos decorrentes.

Dentre os mecanismos legais existentes que visam controlar e garantir a manutenção da qualidade dos corpos receptores pode ser citada a Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005 e sua complementar, n. 430 de 13 de maio de 2011. Ambas merecem destaque uma vez que estabelecem as condições e padrões de lançamento de efluentes baseada na classificação dos corpos de água. Com base nas propriedades físico-químicas do corpo receptor determinam-se os efluentes passíveis de lançamento, procurando-se garantir a



manutenção das propriedades do corpo receptor, ou seja, de seu enquadramento.

Quanto às tecnologias utilizadas, é dever da sociedade como um todo reivindicar que os sistemas de tratamento de efluentes empregados nas estações de tratamento de esgoto sejam capazes de remover a carga orgânica presente e atender as legislações cabíveis, procurando-se garantir a perenidade dos recursos hídricos.

### 3.2 Os sistemas de tratamento de esgotos sanitários

Segundo Von Sperling (1995), a composição dos efluentes líquidos urbanos pode ser dividida de acordo com suas propriedades químicas e biológicas, devendo o tratamento empregado ser capaz de remover os sólidos em suspensão, a matéria orgânica, os nutrientes e os organismos patogênicos presentes.

Os sistemas de tratamento de esgotos sanitários comumente empregados nas ETEs podem adotar diferentes processos e operações para promover a depuração do efluente, mas, de modo geral estas se constituem como aperfeiçoamentos dos processos de depuração que ocorrem naturalmente nos corpos d'água.

Segundo Pecora (2006), as operações consistem na fase física do tratamento, decantação e sedimentação, enquanto os processos constituem a fase química e biológica, contemplando a desinfecção e a digestão.

As etapas de tratamento podem ser divididas em tratamento preliminar, primário, secundário, terciário e desinfecção, descritas abaixo segundo Von Sperling (1995):

- Tratamento preliminar – objetiva a remoção dos sólidos grosseiros e da areia, pelo uso de grades, caixas de areia e, de óleos e graxas por tanques de flutuação. Ao impedir a passagem desses materiais assegura-se a proteção das unidades subsequentes de tratamento, dos dispositivos de transporte (bombas e tubulações) e dos corpos receptores.

- Tratamento primário - essa fase viabiliza a remoção, por meios físicos, dos sólidos sedimentáveis não grosseiros. Para tanto, o efluente passa pelos decantadores com uma velocidade que permite que os sólidos suspensos mais densos sedimentem, compondo o lodo primário bruto, e que as graxas e óleos sejam removidos da superfície. A redução da DBO é

de aproximadamente 30% nessa fase.

- Tratamento secundário – caracteriza-se pela remoção biológica dos poluentes, visando à estabilização da matéria orgânica, à remoção dos sólidos não sedimentáveis e, possivelmente, de nutrientes tais como nitrogênio e fósforo. Basicamente, o que se reproduz nessa fase são fenômenos de estabilização que ocorrem no corpo receptor e possibilitam uma eliminação da DBO de aproximadamente 90% utilizando menor tempo e área.

- Tratamento terciário - promove a remoção da porção não biodegradável e/ou tóxica do efluente que não foi removida na fase secundária.

- Desinfecção - consiste na última fase e, objetiva a eliminação dos microrganismos patogênicos restantes, promovendo a desinfecção do efluente. Pode ser obtida por vias naturais, como a lagoa de maturação, ou pelo processo artificial - via cloração, ozonização ou radiação ultravioleta.

Por fim, quanto à escolha do modelo e da tecnologia a ser empregada nesses sistemas, torna-se clara a necessidade de se considerar a quantidade total de esgoto a ser tratada e, conseqüentemente, a área ocupada pela ETE, além do custo de implantação e manutenção, demanda energética, eficiência de remoção de nutrientes, simplicidade operacional, vida útil, produção de lodo e, evidentemente, as características físico-químicas do esgoto a ser tratado (PECORA, 2006).

### 3.3 O tratamento anaeróbio

O conhecimento e o interesse pelo tratamento anaeróbio cresceram significativamente nas últimas três décadas, devido ao aumento representativo no número de alternativas, tanto no que se refere à concepção física das unidades de tratamento para conversões biológicas, como nas melhorias do processo em si. Tem-se conhecimento, hoje, de que os reatores anaeróbios são capazes de tratar grande diversidade de águas residuárias, inclusive de origem doméstica (SARTI, 2005).

Esta tecnologia apresenta ainda diversas características favoráveis, a saber: baixa produção de sólidos; baixo consumo de energia; baixos custos de implantação e operação;

tolerância às elevadas cargas orgânicas; possibilidade de operação com elevados tempos de retenção de sólidos (biomassa) e baixos tempos de detenção hidráulica - que lhe confere vantagens sobre as demais tecnologias e grande aplicabilidade em situações de alta e baixa concentração de sólidos (CHERNICHARO, 1997 apud. AQUINO; CHERNICHARO, 2005).

Segundo Leite (1999), em um cenário de concentração de sólidos entre 4 e 8%, a massa orgânica passível de decomposição - excretas humanos, resíduos animais e agrícolas - é fermentada e resulta na geração de gás metano. As maiores dificuldades operacionais estão relacionadas à necessidade de adição de água para diluição do substrato e a dificuldade de reutilização do material bioestabilizado.

Já no cenário de elevada concentração de sólidos, em torno de 22%, o tratamento se processa pela fermentação da porção degradável e, se caracteriza pela necessidade de um baixo teor de umidade e de elevada taxa de produção de gás, tornando-a uma ótima opção para a recuperação de energia.

Verifica-se então que na presença significativa de sólidos totais voláteis, ambas as situações se tornam favoráveis à geração do biogás e apresentam baixo consumo de energia.

Assim, tem-se cada vez mais um cenário que favorece o tratamento anaeróbio no Brasil por este ser uma alternativa técnica e economicamente viável e, ainda, viabilizar o aproveitamento do biogás gerado na própria estação, com uso na secagem e higienização do lodo ou como suprimento energético para a aeração do sistema, conforme citado por Van Haandel (1994) apud Veronez (2002).

Os principais tipos de reatores que estão sendo utilizados, na prática no Brasil são: decanto-digestores (fossas sépticas), lagoas anaeróbias, filtros anaeróbios, reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) e, mais recentemente, os reatores anaeróbios compartimentados e de leito expandido ou fluidificado. Esses podem se apresentar individualmente ou em sistemas combinados atendendo às mais diversas situações de arranjo das unidades em Estações de Tratamento (SARTI, 2005).

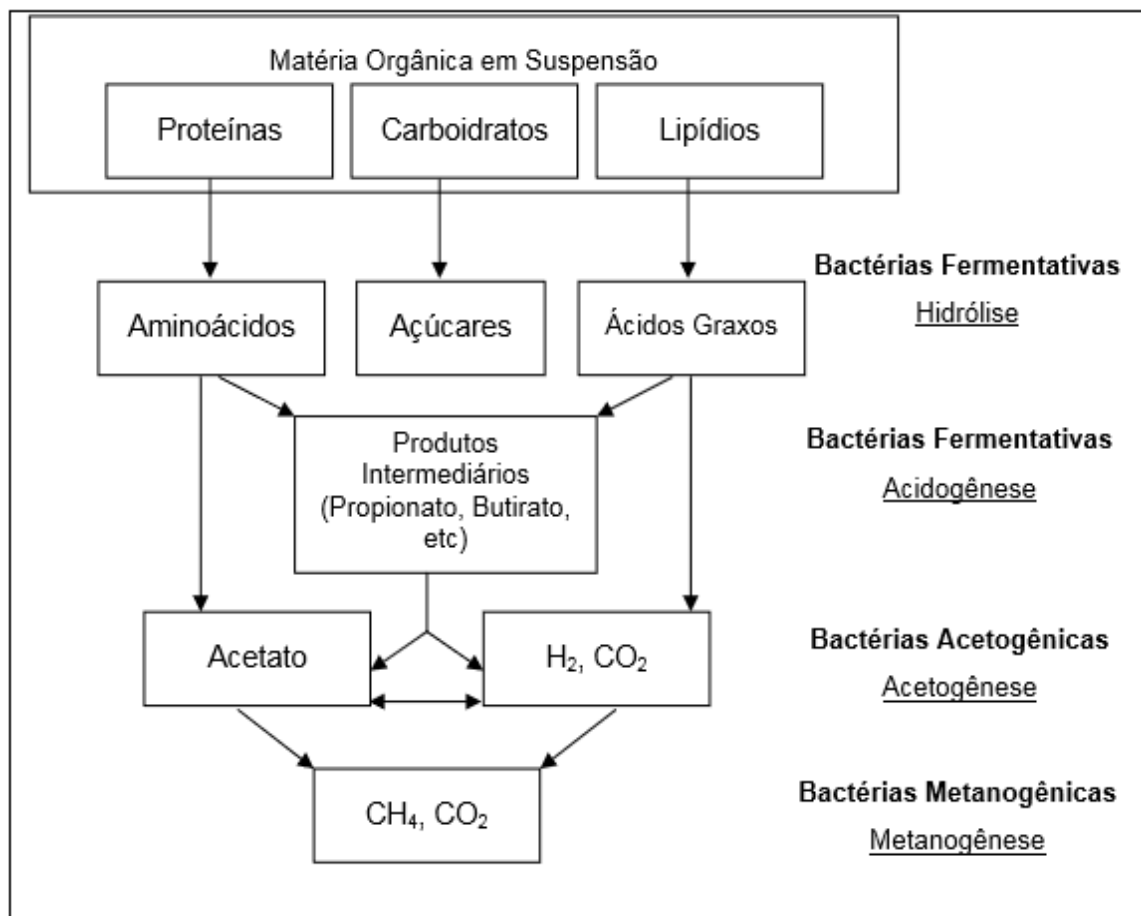
### *3.3.1 Etapas metabólicas da digestão anaeróbia*

A digestão anaeróbia é um processo microbiológico que na ausência de oxigênio a

matéria orgânica é convertida biologicamente em uma mistura de gases, prioritariamente, metano e dióxido de carbono. Esta produção acontece em diversos ambientes naturais como os pântanos, sedimentos de lagos e rios e no aparelho digestivo de animais superiores (CHERNICHARO, 1997 apud VERSIANI, 2005).

Complementarmente, Lettinga et al (1999) apud Faria (2012) afirma que este processo pode ser entendido como um micro ecossistema onde as bactérias ativas trabalham simbioticamente na conversão de matéria orgânica complexa em metano e gás carbônico, tendo como produtos secundários água, gás sulfídrico e amônia, além de células bacterianas.

No entanto, independentemente de onde este processo ocorre, quatro etapas metabólicas são necessárias (Figura 1). Estão elas elucidadas abaixo conforme Caron (2009) e Pecora (2006).



**Figura 1. Sequência esquemática da digestão anaeróbica de orgânicos complexos.**

Fonte: Adaptado de McInerney e Bryant (1981) citado por Versiani (2005).

- Hidrólise - primeira etapa da digestão anaeróbia, onde compostos orgânicos complexos (proteínas, lipídios e carboidratos) são convertidos a compostos orgânicos mais simples (açúcares, aminoácidos e peptídeos) por ação de exoenzimas hidrolíticas – enzimas extracelulares – e se tornam então, passíveis de absorção pelas células bacterianas. Esta pode ocorrer por duas vias distintas: difusão passiva, que ocorre de acordo com o gradiente de concentração ou pelo transporte ativo de proteínas.

A hidrólise se caracteriza por ser um processo lento e suscetível à mudanças de temperatura, pH, composição e tamanho do substrato, concentração de nitrogênio no substrato e tempo de resistência.

- Acidogênese – se inicia com a assimilação dos compostos orgânicos simples resultantes da hidrólise e sua metabolização em ácido propiônico, ácido butírico, ácido acético, ácido láctico, ácido valérico, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e novas células microbianas.

No entanto, o produto final do metabolismo das bactérias atuantes depende do substrato inicial e das condições ambientais, dando ênfase à presença de hidrogênio. Em situações de baixas pressões de hidrogênio, a formação de compostos orgânicos como acetato, dióxido de carbono e hidrogênio é favorecida termodinamicamente. Caso a pressão parcial de hidrogênio seja elevada, ocorrerá somente a formação de produtos como o propionato e, ácidos orgânicos como lactato e etanol (SILVA, 1993 apud CARON, 2009).

A fermentação acidogênica é realizada por um grupo de diversas bactérias, onde a grande maioria é anaeróbia estrita. No entanto, cerca de 1% deste total consiste de bactérias facultativas, capazes de oxidar o substrato orgânico por via oxidativa. Isso é particularmente importante, uma vez que as bactérias anaeróbias estritas devem ser protegidas contra a exposição ao oxigênio eventualmente presente no meio (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994 apud VERSIANI, 2005).

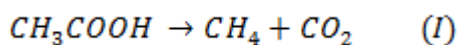
- Acetogênese – se inicia com os metabólitos finais da acidogênese sendo excretados pelas células e entrando em solução no meio. Desta forma, passam a ser substratos para as bactérias acetogênicas, que metabolizam no mínimo 50% da matéria orgânica carbonácea biodegradável, transformando-as em propionato e butirato e então em acetato e hidrogênio, conforme afirma Chernicharo (1997).

Além disso, segundo Van Haandel e Lettinga (1994) apud Versiani (2005),

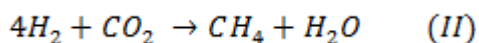
aproximadamente 70% da DQO originalmente presente se converte em ácido acético, ocorrendo também a formação de material celular, conforme afirma Oliva (1997) apud Caron (2009).

- Metanogênese – quarta e última fase da biodigestão anaeróbia é a etapa onde o metano é produzido pelas bactérias acetotróficas (I) e hidrogenotróficas (II) via redução do ácido acético e do gás carbônico, respectivamente. Abaixo, estão explicitadas conforme Versiani (2005) as reações químicas elucidativas das reações supracitadas.

Metanogênese acetotrófica:



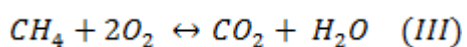
Metanogênese hidrogenotrófica:



Nesse processo, os compostos orgânicos simples são consumidos pelas bactérias estritamente anaeróbias – arqueas metanogênicas – que, conforme explicitado por diversos autores apresentam baixas taxas de crescimento e se desenvolvem preferencialmente em ambientes com pH próximo a neutralidade (entre 6,8 e 7,3), visto sua susceptibilidade à alterações ambientais tais como: mudanças bruscas de temperatura, elevadas concentrações de ácidos orgânicos e presença de material tóxico no meio reacional.

Com relação à solubilidade do metano e do gás carbônico, sabe-se que o primeiro é insolúvel, sendo, portanto, desprezado para a fase gasosa. O segundo já apresenta uma relativa solubilidade em água, passando parcialmente para a fase gasosa.

Em termos de DQO, a produção do metano pode ser expressa conforme a reação abaixo (III), mostrada por Versiani (2005). Além disso, a mesma autora baseando-se em McCarty (1984) afirma que 70% do metano formado provém do acetato.



Percebe-se, com os pontos explorados acima, que a digestão anaeróbia requer

interação das bactérias fermentativas e metanogênicas, sendo o sucesso do processo dependente de um balanço delicado do sistema ecológico.

Se bem sucedida, tal digestão permite redução significativa do potencial poluidor de dejetos orgânicos e representa um processo no qual não há grande geração de calor. Além disso, deve-se atentar à volatilização dos gases, a qual é mínima quando se processa a um pH próximo da neutralidade. Por fim, é relevante considerar também a recuperação de energia na forma de biogás, a reciclagem do efluente e do material digerido, o qual retorna sob a forma de biofertilizante, ou seja, com alto valor de matéria orgânica e NPK (CARON, 2009).

### 3.4 O biogás

O biogás se constitui como uma mistura gasosa com significativo poder de combustão resultante da digestão anaeróbia, processo este caracterizado pela degradação da matéria orgânica. Segundo Souza et al (2005), Coelho et al (2006) apud Zilotti (2012), sua composição típica apresenta cerca de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, amins voláteis e oxigênio.

No entanto, a eficiência do processo, a composição do substrato degradado, bem como a temperatura e a pressão podem influenciar na porção de metano produzido, que pode variar entre 40 e 80%.

Até pouco tempo, o biogás era conhecido como um subproduto da decomposição anaeróbia do lixo urbano, dos resíduos animais e das estações de tratamento de efluentes domésticos (PECORA, 2006). Mas, as dificuldades associadas à comercialização e utilização dos combustíveis tradicionais, bem como as elevadas emissões de GEEs associadas tem resultado em uma crescente preocupação com o uso de fontes alternativas, preferencialmente as renováveis e economicamente atrativas (FUESS, 2012).

Hoje, o processo de recuperação de energia por intermédio do biogás não é consolidado, mas é bastante difundido. As tecnologias existentes hoje se dividem em queima direta ou conversão para eletricidade, totalizando três alternativas distintas (motor combustão, turbina vapor ou turbina gás) que, conforme explica Coelho et al (2006), permitem uma ampla

contribuição para a redução da demanda energética nas ETEs e, conseqüentemente, otimização dos recursos naturais não renováveis.

Seu uso representa, portanto, uma redução da dependência dos combustíveis fósseis, propiciando uma série de vantagens do ponto de vista ambiental (FUESS, 2012). Assim, cada vez mais novas tecnologias para efetuar sua conversão energética são exploradas, independentemente se o processo envolve queima, movimentação de turbinas ou ambos.

### *3.4.1 O potencial energético do biogás*

O potencial energético de qualquer combustível pode ser definido como a quantidade de energia passível de ser obtida a partir de sua combustão (FUESS, 2012). Desta forma, sua determinação baseia-se, de maneira geral, no calor inferior de combustão ou poder calorífico inferior (PCI), definido como a quantidade de calor desprendido pela queima completa de uma unidade de volume ou massa do combustível em questão (BORGES, 2008), considerando que, a água presente permaneça sob a forma de vapor, isto é, a energia obtida pela condensação da mesma não é incluída (FUESS, 2012).

No caso do biogás, conforme citado por Fuess (2012), o potencial energético e conseqüentemente o poder calorífico inferior, dependem diretamente do teor de metano nele presente; quanto maior a quantidade de metano presente, menor será a concentração das outras substâncias comumente encontradas no biogás. Complementarmente, De Sena (2005) apud Borges (2008) destacam que é importante considerar que para um bom rendimento térmico na combustão, o combustível deve possuir uma elevada quantidade de carbono fixo e materiais voláteis, além de alto poder calorífico. Quanto maior o teor de carbono e hidrogênio, melhor será a eficiência da combustão na liberação de energia.

O metano é, portanto, uma alternativa favorável, visto que seu PCI atinge valores de 9,1 kWh/m<sup>3</sup> ou 32,9 KJ/L quando medido a 25°C, assumindo-se uma eficiência média de rendimento do metano igual a 75% e, portanto, uma geração de 0,286 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/KgDQO inserida nos reatores anaeróbios. Sendo assim, quando comparado a outras fontes de energia, o biogás apresenta vantagens representativas, uma vez que seu PCI supera o do etanol e da gasolina e ainda, devido à sua baixa solubilidade, sua separação da porção líquida nos reatores



se constitui como um processo simples e pouco dispendioso (FUESS, 2012).

### 3.5 Mudanças climáticas

Atualmente, os combustíveis fósseis encontram-se entre os principais insumos utilizados na matriz energética mundial, sendo amplamente utilizados nas atividades de manufatura de inúmeros bens de consumo, desempenhando importante papel na sociedade.

No entanto, sabe-se hoje que a sua queima, intensificada após a Revolução Industrial, está também entre as principais causas das emissões de dióxido de carbono na atmosfera e, conseqüentemente, no agravamento do efeito estufa.

Este fenômeno físico-químico natural, responsável pela manutenção do calor e da vida no planeta, é potencializado pela emissão intensa de gases como o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), o metano (CH<sub>4</sub>) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), resultando na elevação da temperatura média global.

Estudos recentes conduzidos por organizações e entidades de referência no assunto, indicam que a situação energética mundial continuará a ser dominada pelos combustíveis fósseis e que, em 2030, representarão quase 90% do consumo energético total conforme explicitado por Faria (2012).

Diante desse cenário pouco promissor, torna-se imediata a necessidade de incentivos econômicos e políticos para desenvolvimento e investimentos em tecnologias limpas que contribuam para a redução dessas emissões. Relatórios de 2014 emitidos pelo IPCC afirmam que o redirecionamento de verbas dos combustíveis fósseis para as energias renováveis, da ordem de trilhões de dólares e, o corte do desperdício de energia significaria uma redução de 0,06% no crescimento econômico anual esperado, que flutua entre 1,3% e 3%.

Além disso, cabe destacar que o relatório não considerou os benefícios da redução das emissões dos gases do efeito estufa – principalmente de dióxido de carbono – que provavelmente resultariam numa diminuição ainda maior destes custos e traria benefícios como a redução da poluição do ar, das doenças associadas ao ar e uma melhor segurança energética.

### 3.5.1 *O Protocolo de Kyoto*

Frente à relevância que o aquecimento global vinha ganhando no cenário mundial, em 1988, foi estabelecido o IPCC pela OMM e pelo PNUMA. Este painel busca avaliar informações científicas, técnicas e socioeconômicas relevantes no contexto das mudanças climáticas e, conseqüentemente fomentar discussões e decisões políticas no âmbito da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente.

Nessa conferência, chamada de ECO-92 ou Cúpula da Terra, realizada no Rio de Janeiro em junho de 1992, 175 países e a União Europeia se tornaram signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima e assim, se comprometeram a criar uma estratégia global que protegesse o sistema climático para as presentes e futuras gerações.

Para atuar como órgão supremo da Conferência foi criada a COP, composta de todos os países que ratificam a Convenção e que, portanto, segundo as normas internacionais, se comprometem legalmente com o seu cumprimento e revisão anual.

Nesse contexto, em 1997, durante a Conferência de Kyoto (COP-3), com sede no Japão, foi estabelecido o Protocolo de Kyoto, que serve como instrumento legalmente vinculante e busca comprometer os países assinantes (39 países industrializados) a reduzirem as emissões de gases do efeito estufa de acordo com as metas estabelecidas, tendo sido prevista uma redução média de 18% das emissões de gases de efeito estufa até 2020 em relação a 1990.

No momento em que foi assinado, o Protocolo de Kyoto pareceu uma solução promissora. Hoje, no entanto, o segundo período de compromisso do Protocolo de Kyoto (2013-2020) está bastante aquém do necessário para mitigação das mudanças climáticas globais, pois os países signatários do COP 18, respondem por apenas 15% do total das emissões de CO<sub>2</sub>.

Isso porque os Estados Unidos e China, que juntos respondem por 40% das emissões de gases poluentes, estão isentos das responsabilidades legais aplicadas aos demais países e evitam quaisquer outras medidas para a diminuição da emissão de poluentes, alegando o risco

de prejudicarem sua economia e perderem espaço no mercado internacional. Soma-se a isso o fato de que a Rússia, o Canadá e a Nova Zelândia retiraram seu apoio para a segunda fase.

Nesse sentido, o Protocolo de Kyoto nunca esteve tão desacreditado, tendo sido relevante no contexto mundial, a realização da COP-21 que buscou estabelecer que os gases potencializadores do efeito estufa - responsáveis por 86% do carbono que chega à atmosfera - permaneçam em níveis que evitem interferências antropogênicas no sistema climático, limitando o aquecimento da temperatura medida da atmosfera a 2°C em relação à era pré-industrial.

### 3.5.2 *Os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo*

Durante o Protocolo de Kyoto foram criados três instrumentos econômicos de flexibilidade para apoiar a redução das emissões dos gases efeito estufa, citados por Faria (2012). São eles:

- Comércio de Emissões (*Emissions Trade - ET*): restrito a empresas de países desenvolvidos, nele são permitidas a compra e a venda do direito de emissão de gases efeito estufa;

- Implementação Conjunta (*Joint Implementation - JI*): estabeleceu que os países constantes no Anexo I podem, entre si, idealizar e conduzir projetos para redução das emissões;

- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (*Clean Development Mechanism - CDM*): estabelecido no artigo 12 do Protocolo, tem com objetivo ajudar os países desenvolvidos a atingir suas metas de redução dos gases causadores de efeito estufa.

A proposta de criação partiu do Brasil e busca beneficiar também as nações em desenvolvimento que, ao colocarem em prática os projetos de MDL, podem vender os créditos de carbono gerados para os países desenvolvidos, aplicando as quantias no combate às mudanças climáticas.

Com a ratificação do Protocolo, entre 2008 e 2012, os 34 signatários, listados no Anexo I, comprometem-se a reduzir suas emissões de GEEs em 5,2% na média, em relação

aos níveis medidos em 1990 (Portal Brasil, 2012). Nesse sentido, a redução das emissões de metano na atmosfera é de grande relevância no contexto das mudanças climáticas, visto que 45% provêm de fontes naturais e 55% de fontes antropogênicas (LELIEVELD et al., 1998 apud OLIVEIRA, 2009).

## 4 METODOLOGIA

Este trabalho tem como primeira etapa uma fundamentação teórica na forma de revisão bibliográfica. As fontes de informações que foram empregues contemplaram livros, apostilas, artigos, dissertações e teses vinculadas ao tema, objetivando a reunião de no mínimo 30 referências que contivessem informações a respeito do tratamento anaeróbio dos esgotos sanitários, sejam eles em escala real, piloto ou laboratorial. Um exemplo é o trabalho realizado por Zilotti, onde o potencial de produção de biogás da ETE de Cascavel é investigado para a geração de energia.

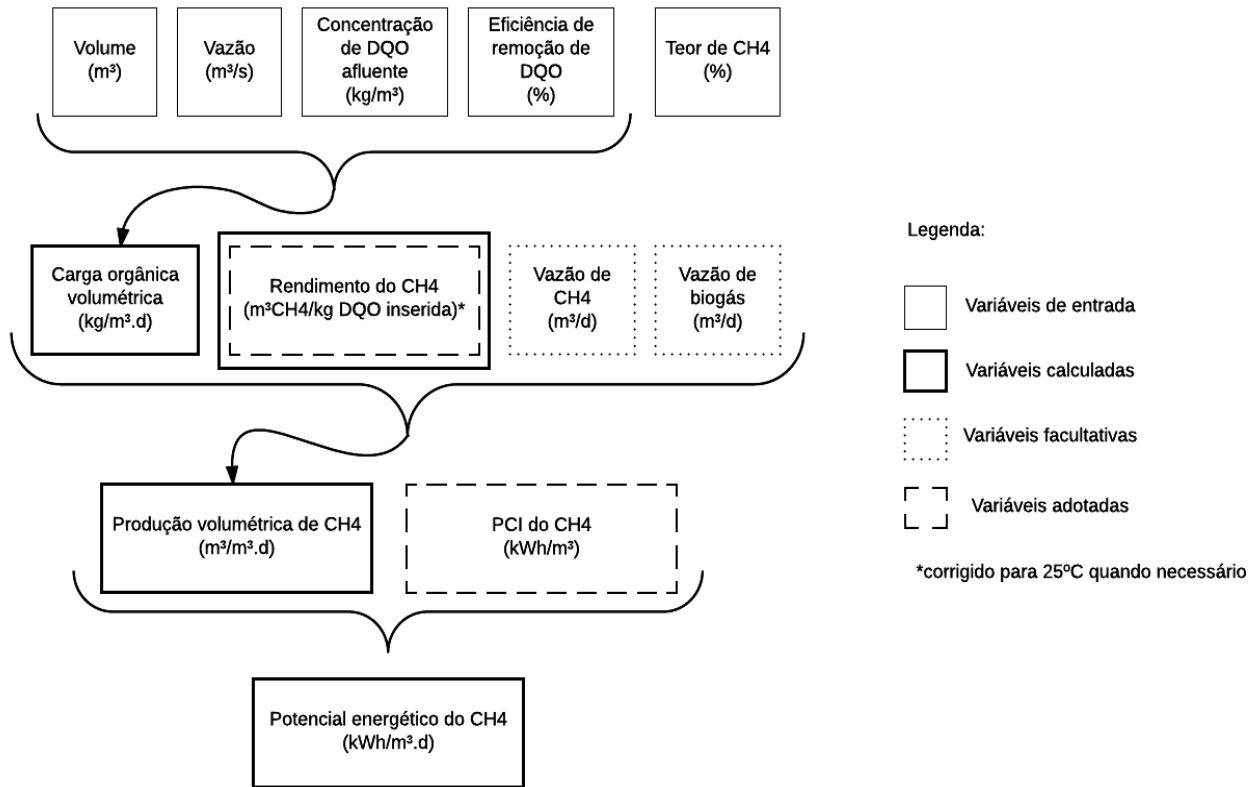
As informações e dados relevantes relativos aos diferentes reatores e escalas estudadas foram reunidos em uma tabela, semelhante à apresentada por Fuess (2012), que compila os dados de entrada experimentais de diversos trabalhos científicos referentes à eficiência de remoção de DQO obtida a partir da aplicação de processos anaeróbios ao tratamento da vinhaça.

No presente trabalho, no entanto, outros parâmetros além da DQO foram considerados, tais como o tipo de reator empregado, sua escala, volume, concentração afluente de DQO, respectivas eficiências de remoção e teor de metano. Estes permitiram a obtenção da carga orgânica volumétrica de entrada ( $\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ ), que associada ao rendimento de metano ( $\text{m}^3/\text{kgDQO}$ ), possibilita a obtenção dos valores de produção volumétrica do metano ( $\text{m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ ).

Para cômputo dos valores teóricos - valores que expressam as condições ideais de aproveitamento energético do biogás - foi adotado um valor de rendimento de metano ( $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kgDQO}$ ) baseado em Fuess (2012), já padronizado para as condições de operação de  $25^\circ\text{C}$ . Os valores reais, por sua vez, foram obtidos a partir de valores de rendimento de metano reportados experimentalmente pelos autores estudados ou ainda a partir das vazões de biogás e/ou metano, tendo sido feita a correção para a temperatura de  $25^\circ\text{C}$  quando necessário. Por fim, ainda baseando-se em Fuess (2012) foi adotado um PCI ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ ) para o metano, a partir do qual foi possível obter-se o potencial energético do metano ( $\text{kWh}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ ).

As etapas descritas acima estão melhor elucidadas na Figura (2) e permitiram a obtenção das variáveis de interesse, possibilitando análises a respeito dos valores obtidos foram conduzidas de modo a verificar a real eficiência e viabilidade de aproveitamento

energético dos processos anaeróbicos.



**Figura 2. Fluxograma elucidativo das etapas para obtenção dos resultados.**

Fonte: Elaborada pela autora (2016).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O trabalho aqui desenvolvido apresenta inicialmente como resultado uma compilação dos diversos estudos levantados, tendo sido analisados os objetivos, a metodologia e os resultados obtidos pelos respectivos autores. Tais elementos permitem uma melhor compreensão dos valores obtidos para os rendimentos e os potenciais energéticos teóricos e reais do metano que, conseqüentemente, incluem a percepção da real viabilidade de utilização da tecnologia anaeróbia para recuperação do biogás.

Objetivando gerir e contribuir para a eficiência energética da Universidade de São Paulo, Pecora (2006) investigou a composição do esgoto sanitário produzido pelo CRUSP e do biogás gerado pelo seu tratamento anaeróbio, com o auxílio da Ambiental Laboratório e Equipamentos Ltda e da COMGAS, respectivamente. Para obtenção da vazão diária de biogás estimada, a autora calculou a carga orgânica presente no esgoto efluente a partir dos valores de DBO e da vazão diária de esgoto e estimou a geração de carga orgânica por pessoa por dia, permitindo assim a obtenção do número de moradores do CRUSP. Em seguida, adotando-se uma geração de biogás 12 l/hab.dia, a vazão estimada de biogás foi de 5,27 m<sup>3</sup>/dia. No caso dos valores reais de vazão média diária de biogás foi instalado, no final da tubulação, um conjunto medidor-totalizador de vazão, que calculou uma produção de 4 m<sup>3</sup>/dia.

Assim, de acordo com a autora, considerando o reator em escala de demonstração empregado no estudo, atestou-se a inviabilidade do aproveitamento energético em quantidade que contribui para a demanda do campus universitário e para viabilizar incentivos permanentes ao uso eficiente e racional de energia. Isto porque o volume de esgoto sanitário tratado e, conseqüentemente o volume de biogás gerado se mostrou insuficiente para que o grupo gerador de 18 kW empregado no estudo funcione continuamente sem paradas. Desta forma, para possibilitar o aproveitamento do biogás para geração de energia é de fundamental importância considerar o tamanho da ETE, devendo esta atender no mínimo uma população de 10.000 habitantes, com capacidade de geração de biogás durante 24h, totalizando 5.544 kWh/mês.

Estudo semelhante foi conduzido por Veronez (2002) na ETE-UFES, onde foram monitorados um reator UASB e três biofiltros, que se diferenciaram pelas características de seus meios filtrantes, tratando o esgoto sanitário proveniente do Campus Universitário de

Goiabeiras. Para atestar o volume de biogás passível de ser coletado, foram monitorados os resultados obtidos de 246 observações do volume de biogás produzido (litros/hora) e de DQO removida. Assim, obteve-se uma vazão de 6.288 litros de biogás capturado por dia, cujo teor de metano de aproximadamente 70%, resultou num volume equivalente a 4.402 litros de metano capturado por dia, equivalente a 211,6 ml CH<sub>4</sub>/g DQO removida.

A viabilidade de utilização do biogás produzido para geração de energia não foi investigada pela autora, mas o emprego em escala real da associação de reatores UASB + Biofiltros aerados submersos se mostrou uma alternativa viável e interessante do ponto de vista econômico e operacional.

Um estudo detalhado foi desenvolvido por Souza (2010), que buscou avaliar os processos de formação, desprendimento e consumo do metano e do sulfeto de hidrogênio, resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB no atual CePTS, antes chamado de ETE experimental UFMG/COPASA. Este recebe esgoto sanitário já submetido ao tratamento preliminar oriundo da região metropolitana de Belo Horizonte e conta com três unidades de reatores UASB denominados Rpil\_conv, Rpil\_mod, e Rdemo, com volumes totais de 0,34 m<sup>3</sup> para os dois primeiros em escala piloto e, 14 m<sup>3</sup> para o último, em escala real.

No entanto, em termos de produção volumétrica de biogás, concentração de metano no biogás, DQO afluente e removida foram operados somente dois dos reatores apresentados, sendo o primeiro o Rpil\_conv com tempo de detenção hidráulica de 5h e 7h e o Rdemo de 12h. O monitoramento dos gases foi realizado por métodos distintos em virtude das diferentes escalas de reatores empregadas. Assim, no reator piloto, a instalação de uma tampa permitiu o isolamento completo da fase gasosa do decantador, enquanto que, no decantador demonstração, foi instalada uma câmara de fluxo que viabilizou o monitoramento do desprendimento dos gases dissolvidos a partir dessa superfície líquida (SOUZA, 2010).

De posse das vazões de gás medidas e dos dados de entrada, obteve-se a produção volumétrica de metano e o teor de metano no biogás gerado para os três cenários diferentes. Para o reator Rpil\_conv foi obtida uma produção volumétrica de 76 l CH<sub>4</sub>/d e 72 l CH<sub>4</sub>/d e um teor de metano de 62,9% e 69,9% respectivamente para os tempos de detenção hidráulica de 5 e 7h. Já para o Rdemo os valores foram de 1.540 l CH<sub>4</sub>/d e 74,2%.

Todos os resultados apresentados por Souza permitiram analisar que a eficiência de



conversão de DQO em CH<sub>4</sub> foi próxima de 55% e que a relação DQO/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> elevada favoreceu, na zona de digestão dos reatores, a formação de metano não tendo sido avaliada no âmbito deste trabalho a viabilidade de geração de energia. Por fim, conforme destaca o autor, 38% do metano produzido permaneceu dissolvido e se dirigiu à fase líquida do decantador, devendo estas perdas serem investigadas e revertidas, de modo a maximizar a concentração de metano no biogás.

Buscando verificar o potencial do uso do biogás gerado na ETE de Barueri (administrada pela SABESP) como combustível para a geração de energia elétrica, Coelho (2006) obteve um volume médio diário de biogás gerado pelas unidades de tratamento secundárias de aproximadamente 24.000 m<sup>3</sup> com um teor de metano de 66,5%. No estudo, avaliou-se a eficiência do emprego de uma microturbina Capstone de 30 kW de potência (ISO) com combustão interna do tipo ciclo-Otto, em conjunto com o sistema de purificação do biogás, para geração de energia para a própria planta da ETE.

O uso de biogás como fonte para geração de energia comprovou-se viável, visto que permite uma redução de 20% no consumo de eletricidade da planta, valor este significativo quando se considera seu tamanho e, que a relação produção/consumo não varia com o tamanho da planta. Além disso, os benefícios econômicos e ambientais suplantam os custos iniciais elevados para compra da microturbina, visto que cada kWh produzido permite uma redução de 0,5 toneladas nas emissões de carbono.

Um projeto de ampliação da ETE de Barueri, conduzido por Malaquias (2004), verificou que a mesma estação opera com oito digestores de cobertura fixa que totalizam um volume de 10.492 m<sup>3</sup> e uma vazão média de 9,5 m<sup>3</sup>/s sendo a maior da América Latina. O valor de DBO afluente e de sua eficiência de remoção foram respectivamente de 0,233 kg/m<sup>3</sup> e 90%.

A Estação Norte da ETE, localizada no município de Cascavel, é operada pela SANEPAR e foi investigada por Faria (2012), que buscou determinar a eficiência do sistema - dois reatores UASB em paralelo seguidos de duas lagoas facultativas em série - para fins de aproveitamento energético do biogás gerado durante os anos de 2010 e 2011, tendo, portanto, analisado os potenciais teóricos de produção de eletricidade.

As análises conduzidas nos reatores, tendo cada um 4.000 m<sup>3</sup> de volume, reportaram um índice de remoção da carga orgânica em torno de 82% e 83% de DQO bem como uma

média de produção de biogás de 513 e 702 m<sup>3</sup> biogás/dia, respectivamente nos anos de 2010 e 2011. Tais valores foram obtidos a partir dos valores de DQO, vazão média de entrada e índice de produção de biogás.

O estudo comprovou a adequada eficiência da ETE Norte visto que seus afluentes se enquadram nas normas ambientais e que a mesma apresenta um potencial teórico de produção de biogás que permite o aproveitamento energético do mesmo ou, até mesmo, a obtenção dos CREs relativos à diminuição das emissões de GEE pela queima do metano presente (FARIA, 2012).

Durante o mesmo período a mesma ETE foi estudada por Zilotti (2012) e teve seus potenciais reais de produção de biogás e de geração de energia para atendimento ETA 1 investigados. O autor, no entanto, reporta valores únicos para todos os parâmetros, que correspondem às médias para os anos de 2010 e 2011. Os valores de entrada reportados foram de 572,91 mg/L para a concentração de DQO afluente e de 81,64% para a eficiência de remoção ao longo do tratamento.

A vazão de biogás foi determinada por uma série de nove medições realizadas durante 5 dias do ano de 2011 por meio da conexão de uma mangueira flexível e de uma régua vertical graduada a um ponto de saída, onde a velocidade de deslocamento de uma esfera de volume conhecido em um trecho específico possibilitou a determinação da vazão de biogás do reator, estimada em 624 m<sup>3</sup>/d com um teor de metano de 74,8%. Esta vazão foi atribuída também para o ano de 2010, visto que o reator operou em ambos os anos estudados sob as mesmas condições.

Segundo Zilotti (2012) a geração de energia elétrica total estimada foi satisfatória, podendo evitar um gasto médio mensal de R\$ 22.828,30 na compra de energia elétrica da concessionária de energia pela ETA 1. No entanto, o autor ressalta a importância da avaliação dos métodos de transporte e de armazenamento do biogás nos momentos de produção e geração de modo a se verificar a real viabilidade deste projeto. Por fim, é importante ressaltar que o valor médio de produção de biogás obtido experimentalmente pelo autor não difere de forma significativa do valor médio teórico de produção de biogás apresentado por Faria (2012).

Em sua tese, Pontes (2003) buscou investigar e entender a influência do retorno e da digestão anaeróbia do lodo oriundo de um FBP em reatores UASB em escala piloto e de

demonstração. Os experimentos foram então realizados em quatro fases distintas que permitiram verificar os efeitos da presença ou ausência do retorno do lodo na degradação do material orgânico e, conseqüentemente, nas propriedades da biomassa dos reatores. As 4 fases são:

- Fase 1: escala piloto, com o reator UASB operando sem retorno de lodo do FBP
- Fase 2: escala piloto, com o reator UASB operando com retorno de lodo do FBP
- Fase 3: escala de demonstração, com o reator UASB operando sem retorno de lodo do FBP
- Fase 4: escala de demonstração, com o reator UASB operando sem retorno de lodo do FBP

Para os reatores de escala piloto, com volume útil de 0,4 m<sup>3</sup> cada, o autor obteve uma eficiência de remoção de DQO de 74 e 75% respectivamente para as fases 1 e 2. Já, para os de escala de demonstração, com 22 m<sup>3</sup> cada, a eficiência de remoção de DQO foi mais baixa, sendo aproximadamente 59 e 63% para as fases 3 e 4 respectivamente.

Em termos de produção de biogás, para as fases 1 e 2 foram obtidos respectivamente valores de 7,4 l/h e 8,2 l/h para a vazão de biogás, com teores de metano de 78% e 76%. Já, nas fases 3 e 4 as vazões foram de 195,8 l/h e 250 l/h com teores de 77% e 76%. Assim, apesar das concentrações médias de DQO serem semelhantes para todas as fases, foi identificado um aumento do teor de metano nos reatores que operaram com retorno do lodo (Fase 2 e 4). Este aumento, pode estar relacionado à maior mistura que ocorre nos reatores com retorno e conseqüentemente à maior área de contato entre as partículas, tendo em vista o bombeamento semi-contínuo e/ou a mudança no tamanho de partículas do lodo, que favoreceram uma maior produção de gás (PONTES, 2003). Por fim, o potencial de geração de energia não foi avaliado no âmbito desse trabalho.

O tratamento de esgotos sanitários brutos operando em temperatura ambiente em um reator UASB sem inóculo, com volume de 120 litros e tempo de detenção hidráulica de 4 horas, foi estudado por Barbosa (1989). A unidade experimental foi instalada em Ponta Leal (Florianópolis), antes da estação de bombeamento operada pela CASAN e, teve como objetivo verificar o desempenho do reator em termos de remoção de matéria orgânica durante os nove meses de monitoramento.

Durante esse período, o reator foi mantido operando entre as temperaturas de 18°C e 28°C e verificou-se uma concentração de DQO de entrada de 627 mg/L. Tais condições possibilitaram, a partir do 4º mês, um desempenho satisfatório ao reator, cuja capacidade de remoção de DQO atingiu 74%, a produção de biogás uma taxa de 80 litros por Kg de DQO inserida e um teor de metano 69%.

É importante observar que a elevada porção de materiais suspensos no esgoto pode ter favorecido o sucesso dos resultados, mas que, outros autores citados por Barbosa também apresentam valores que indicam que um reator UASB, operado desde o início em temperatura ambiente, sem inóculo e com tempo de detenção hidráulico significativo pode viabilizar um tratamento adequado do esgoto sanitário. Tais estudos contribuem então para uma maior aplicação de reatores do tipo UASB, visto que a inoculação é um procedimento de difícil execução, além de apresentar elevados custos.

A Tabela 1 foi elaborada para simplificar a visualização das diferentes bibliografias estudadas no que tange às escalas de investigação e volumes dos reatores operados e, desta forma, proporcionar uma discussão aprofundada sobre a possibilidade de uso do biogás para recuperação de energia.

Uma primeira observação nos permite verificar que a maioria dos autores empregaram em seus trabalhos reatores UASB e que, portanto, esta tecnologia se constitui como uma tecnologia promissora para esse tipo de análise, visto que promove um tratamento eficaz dos esgotos sanitários e possibilita a geração de biogás. Além disso, no que tange às escalas empregadas, é possível notar que mais da metade dos trabalhos utilizam escalas reais de reatores.

**Tabela 1: Caracterização dos reatores anaeróbios investigados.**

Referência	Tipo de reator	Escala	Volume (m <sup>3</sup> )
Pecora, 2006	UASB	Real	25
Veronez, 2002	UASB	Real	26,5
		Piloto	0,34
Souza, 2010	3 reatores UASB	Real	14
		Piloto	0,34
Coelho et al., 2006; Malaquias, 2004	8 digestores de cobertura fixa	Real	10.492 <sup>a</sup>
		Piloto	0,4
		Piloto	0,4
Pontes, 2003	UASB	Real	22
		Real	22
		Piloto	0,12
Faria, 2012	2 reatores UASB	Real	8.000 <sup>a</sup>
Zilotti, 2012	2 reatores UASB	Real	8.000 <sup>a</sup>

Fonte: Elaborada pela autora (2016). <sup>a</sup>: volume total dos reatores empregados.

Adicionalmente, como forma de caracterizar as condições nas quais operam os reatores estudados e possibilitar as análises desejadas, os parâmetros de entrada reportados nos trabalhos estudados foram reunidos na Tabela 2.

As vazões afluentes aos reatores associadas às concentrações de DQO permitiram a obtenção dos valores de carga orgânica volumétrica de entrada (kg/m<sup>3</sup>. d) para cada uma das escalas e cenários. Esta representa a quantidade de matéria orgânica passível de ser decomposta por dia e por unidade volumétrica de reator estando, portanto, diretamente relacionada aos valores reais e teóricos de produção volumétrica de metano e conseqüentemente, com o potencial energético das unidades de tratamento estudadas.

**Tabela 2: Parâmetros químicos iniciais relevantes para análise do aproveitamento energético.**

Referência	Volume (m <sup>3</sup> )	Concentração de DQO afluente (kg/m <sup>3</sup> )	Eficiência de remoção de DQO (%)	COV (kg/m <sup>3</sup> . d)
Pecora, 2006	25	1,02	85,8	2,9376
Versiani, 2002	26,5	0,4	60	1,3094
	0,34	0,4706	70,18	2,2588
Souza, 2010	14	0,4594	62,63	0,8782
	0,34	0,5088	70,24	1,8676
Coelho et al., 2006; Malaquias, 2004	10.492	0,233 <sup>a</sup>	90 <sup>a</sup>	8,4424 <sup>a</sup>
	0,4	0,534	74	2,4
	0,4	0,42	75	1,9
Pontes, 2003	22	0,492	59	1,5
	22	0,361	63	1,1
Barbosa, 1989	0,12	0,627	74	3,762
Faria, 2012 <sup>b</sup>	8.000	0,4952	82	0,7135
	8.000	0,6726	83	0,9951
Zilotti, 2012	8.000	0,5729	81,64	0,7734

Fonte: Elaborada pela autora (2016). <sup>a</sup>: valores em função da DBO em virtude da indisponibilidade dos dados relativos à DQO, <sup>b</sup>: valores relativos anos de 2010 e 2011, respectivamente na primeira e na segunda linha.

A partir da Tabela 2, desenvolveram-se os cálculos que possibilitaram a obtenção dos valores teóricos de produção volumétrica e potencial energético do metano apresentados na Tabela 3.

A produção volumétrica foi obtida a partir do valor de 0,381 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kg DQO adotado como rendimento teórico de metano que considera condições mesofílicas de tratamento (T=25°C) (FUESS, 2012) e, que expressa numericamente, as condições ideais de operação dos reatores e oferece suporte para análise dos valores reais. O potencial energético,

por sua vez, deriva dos demais valores e utiliza o PCI de 9,1 kWh/m<sup>3</sup> ou ainda 32,9 KJ/l, que considera a temperatura de 25°C, a mesma adotada por Fuess (2012).

**Tabela 3: Resultados teóricos obtidos em condições mesofílicas (T=25°C) a partir dos parâmetros de entrada.**

Referência	Teor de CH <sub>4</sub> (%)	COV (kg/m <sup>3</sup> .d)	Produção volumétrica de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> .d)	Potencial energético do CH <sub>4</sub> (kWh/m <sup>3</sup> .d)
Pecora, 2006	80,8	2,9376	1,1192	10,1847
Veronez, 2002	70	1,3094	0,4989	4,54
	62,9	2,2588	0,8606	7,8315
Souza, 2010	74,2	0,8782	0,3346	3,0444
	69,9	1,8676	0,7115	6,4746
Coelho et al., 2006; Malaquias, 2004	66,4	8,4424 <sup>a</sup>	3,2166	29,2711
	78	2,4	0,9144	8,321
	76	1,9	0,7239	6,5875
Pontes, 2003	77	1,5	0,5715	5,2006
	76	1,1	0,4191	3,8165
Barbosa, 1989	69	3,762	1,4333	13,0432
	60	0,7135	0,2718	2,4734
Faria, 2012	60	0,9951	0,3791	3,4498
	60	0,9951	0,3791	3,4498
Zilotti, 2012	74,8	0,7734	0,2947	2,6818

Fonte: Elaborada pela autora (2016).

A Tabela 4, análoga à Tabela 3, apresenta os valores reais de produção volumétrica e potencial energético do metano, obtidos por meio dos valores de rendimento do biogás medidos experimentalmente. Estes, quando necessário, foram corrigidos para a temperatura de 25°C, de modo que as condições de operação dos reatores fossem padronizadas e a comparação com os valores teóricos pudesse ser realizada. Além disso, o PCI foi o mesmo utilizado no cálculo do potencial energético teórico.

**Tabela 4: Resultados reais obtidos em condições mesofílicas (T=25°C) a partir dos procedimentos experimentais e parâmetros de entrada.**

Referência	Teor de CH <sub>4</sub> (%)	COV (kg/m <sup>3</sup> .d)	Rendimento do CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Kg DQO)	Produção volumétrica de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> .d)	Potencial energético do CH <sub>4</sub> (kWh,m <sup>3</sup> .d)
Pecora, 2006	80,8	2,9376	0,04804	0,1411	1,284
Veronez, 2002	70	1,3094	0,231	0,3025	2,7528
	62,9	2,2588	0,0989	0,2234	2,0329
Souza, 2010	74,2	0,8782	0,1252	0,1099	1,000
	69,9	1,8676	0,1134	0,2118	1,9274
Coelho et al., 2006; Malaquias, 2004	66,4	8,4424 <sup>a</sup>	0,1967	1,6606	15,1115
	78	2,4	0,1594	0,3826	3,4817
Pontes, 2003	76	1,9	0,219	0,4161	3,7865
	77	1,5	0,1164	0,1746	1,5889
	76	1,1	0,1999	0,2199	2,0011
Barbosa, 1989	69	3,762	0,06026	0,2267	2,063
	60	0,7135	0,05886	0,042	0,3822
Faria, 2012	60	0,9951	0,05776	0,05748	0,5231
	60	0,9951	0,05776	0,05748	0,5231
Zilotti, 2012	74,8	0,7734	0,07544	0,05834	0,5309

Fonte: Elaborada pela autora (2016).

De maneira geral, a Tabela 4 permite verificar que cerca de 60% dos autores empregaram reatores em escalas reais em seus trabalhos, o que nos conduz à hipótese de que seus resultados se aproximam de uma representação real do que seria o aproveitamento energético do biogás gerado pelo tratamento anaeróbio de esgotos sanitários e assim, favorecem as análises e conclusões deste trabalho.

Além disso, cerca de 50% dos trabalhos pesquisados não tinham como objetivo principal mensurar e avaliar este potencial e, desta forma, os procedimentos experimentais e



dados obtidos relativos à atividade metanogênica não apresentam o mesmo rigor dos trabalhos que tinham esta avaliação como objetivo central.

Apesar disso, aproximadamente 40% dos trabalhos atestaram a viabilidade do aproveitamento energético do biogás gerado, seja para reduzir o consumo da própria ETE, alimentar outro tipo de atividade ou ainda, gerar créditos de carbono. Destes, 100% das investigações foram conduzidas em reatores de escala real.

Os 10% restantes, correspondem ao estudo conduzido por Pecora (2006), no qual a inviabilidade de geração de energia a partir do biogás a ponto de permitir incentivos permanentes a esta tecnologia foi atestada. No entanto, a autora deixa claro que um maior número de habitantes atendidos e conseqüentemente, um maior volume de esgoto sanitário sendo tratado, poderia vir a viabilizar a geração de biogás em quantidade suficiente para operar um gerador por 24h e gerar quantidade significativa de energia.

A mesma tabela nos permite ainda análises mais detalhadas a respeito dos dados apresentados. É possível notar que os valores reais de rendimento do metano apresentam-se relativamente próximos uns dos outros, com poucos *outliers* e, portanto, conduzem a valores idênticos de média e mediana, iguais a 0,12. Além disso, a variância e o desvio padrão obtidos, respectivamente 0,0042 e 0,065, podem ser considerados baixos, evidenciando que o universo amostrado apresenta baixa variabilidade, possivelmente, porque os valores de rendimento do metano advêm das concentrações de DQO afluentes parametrizadas em função do volume dos reatores.

Já os valores de potencial energético se apresentam aproximadamente 2,8 vezes maiores que os valores reais, valores estes apresentados na Tabela 5. Esta diferença decorre, provavelmente, de dois fatores:

- 1) Das condições ideais intrínsecas ao cálculo dos valores teóricos que, diferentemente dos valores reais, não apresentam variações nas condições operacionais do reator e imprecisões experimentais nas medições do volume de biogás gerado e do teor de metano do mesmo e;
- 2) Da baixa eficiência associada ao aproveitamento energético do biogás em condições reais.

A mesma relação pode ser expressa também em termos percentuais, onde as porcentagens apresentadas não superam o valor de 60% e, resultam em uma média de eficiência de 33%, valor este que reforça a ideia apresentada no parágrafo anterior.

**Tabela 5: Comparação dos valores dos potenciais energéticos teóricos e reais do metano e análise da eficiência.**

Referência	Potencial energético teórico do CH <sub>4</sub> (kWh/m <sup>3</sup> .d)	Potencial energético real do CH <sub>4</sub> (kWh/m <sup>3</sup> .d)	Eficiência do potencia. energético (%)
Pecora, 2006	10,1847	1,284	12,6071
Veronez, 2002	4,54	2,7528	60,6344
	2,7618	2,0338	25,9579
Souza, 2010	0,03965	1,001	32,8418
	4,2497	1,9274	29,7686
Coelho et al., 2006; Malaquias, 2004	29,2711	15,1115	51,6260
	8,321	3,4817	41,8423
Pontes, 2003	6,5875	3,7865	57,4801
	5,2006	1,5889	30,5522
	3,8165	2,0011	52,4328
Barbosa, 1989	13,0432	2,063	15,8167
	2,4734	0,3822	15,4524
Faria, 2012	3,4498	0,5231	15,1632
	2,6818	0,5309	19,7964

Fonte: Elaborada pela autora (2016).

Ademais, uma análise dos valores de potencial energético real do metano obtidos e evidenciados na Tabela 5 se faz necessária, juntamente com uma avaliação da viabilidade do aproveitamento energético do biogás. Esta análise, diferentemente da anterior, contemplará somente o valor médio, uma vez que a variância e o desvio padrão obtido revelam a grande variabilidade dos dados, decorrente da diversidade de escalas apresentadas.

Conforme se verifica, analisando a coluna que apresenta os valores de potencial energético real do metano, a quantidade de energia é dada por unidade volumétrica de reator por dia, sendo a média de aproximadamente 2,75 kWh/d.m<sup>3</sup>. Esta nos permite afirmar que cada m<sup>3</sup> de reator é capaz de suprir 55% da demanda energética de uma residência brasileira que, segundo Fedrigo et al. (2009), atinge o consumo mensal de 152 kWh por residência.

Considerando-se ainda os reatores anaeróbios operados pela ETE de Barueri, que totalizam um volume de 10.492 m<sup>3</sup>, é possível obter um potencial energético de aproximadamente 28.853 kWh/dia, capaz de suprir aproximadamente 5.700 residências brasileiras padrões.

Em um primeiro momento, em virtude do baixo número de residências atendidas e do total de quilowatts gerados o aproveitamento energético do biogás não parece promissor. No entanto, considerando que o país apresenta, em diversos pontos, um cenário favorável decorrente principalmente das condições climáticas que dispensam o uso de aquecedores para operação dos reatores – procedimentos que ocorrem em diversos países durante o inverno - pode-se afirmar que a recuperação energética do biogás se torna mais atrativa, visto a baixa demanda energética das estações de tratamento no país.

Atrelado a isso, é de fundamental importância que novas tecnologias, que permitam uma recuperação cada vez mais eficiente, sejam desenvolvidas possibilitando um aumento no montante de energia gerado e contribuindo para tornar essa tecnologia mais atrativa aos olhos dos investidores e capaz de suprir demandas energéticas mais elevadas que extrapolem os limites da estação de tratamento.

Tal fato é reforçado principalmente quando se compara os valores de projeto e reais reportados pela SANEPAR que, desde 2008, conta com um sistema de coleta, armazenamento e queima do biogás oriundo dos processos anaeróbios da ETE Ouro Verde. Segundo as estimativas realizadas pela companhia durante a fase de projeto, a geração de energia estimada através do biogás era de 16.200 kWh/ano, no entanto hoje, operando-se sistema viu-se que a capacidade de produção é na verdade 3.600 kWh/ano.

Apesar da baixa eficiência associada ao aproveitamento energético do biogás em situações reais, a estação já deixou de emitir 1,5 toneladas de metano por ano no meio ambiente e tem capacidade para suprir a demanda interna da própria ETE que é de aproximadamente 1.200 kWh/ano.

## 6 CONCLUSÃO

O aproveitamento energético do biogás é ainda hoje incipiente e pouco incentivado no Brasil, visto que a matriz energética se encontra alicerçada em outras fontes renováveis de energia. Contudo, frente ao rápido desenvolvimento e crescimento econômico do país há, cada vez mais, uma acentuada necessidade energética que a médio e longo prazo deverá ser suprida por outras fontes mais limpas.

Diante desse cenário, do cumprimento dos objetivos deste trabalho e dos resultados obtidos, pode-se dizer que, o aproveitamento energético do biogás oriundo da digestão anaeróbia de esgotos sanitários apresenta-se hoje, como uma alternativa viável e com grande potencial de aplicação no Brasil principalmente pela possibilidade de se atrelar a geração de energia – reduzindo a demanda por outras fontes – com o tratamento adequado dos efluentes gerados.

As condições climáticas tropicais existentes no Brasil contribuem para potencializar este aproveitamento, visto que a média anual de temperatura é de 25°C, condição esta que dispensa o uso de energia para aquecimento e manutenção da temperatura ideal dos processos anaeróbios durante o inverno e, contribui para valores ótimos de rendimento do biogás e teor de metano.

Desta forma, para que o uso dessa fonte se torne uma realidade no país, faz-se necessário o financiamento público e privado de pesquisas e projetos científicos como os das bibliografias aqui apresentadas, que objetivam comprovar sua real viabilidade, eficiência e taxa custo benefício, contribuindo para o desenvolvimento de novas tecnologias, eficientes e economicamente acessíveis.

Somente assim, será possível a criação de condições políticas, financeiras e tecnológicas adequadas que permitam uma ruptura nas barreiras hoje existentes e fomentem o mercado fornecedor das tecnologias, estimulando legal e economicamente os detentores de aterros e ETEs a praticarem esta recuperação, tornando a produção limpa e sustentável de energia factível e permitindo uma movimentação da economia do país com redução das emissões de metano na atmosfera e geração de créditos de carbono via MDL.

## 7 REFERÊNCIAS

AQUINO, S. F. De; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de Ácidos Graxos Voláteis (AGVs) em Reatores Anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Engenharia Ambiental e Sanitária**, Belo Horizonte, v. 10, n. 2, p. 152-161, abr. – jun., 2005.

BARBOSA, R. A.; SANT'ANNA JR, G. L. Treatment of raw domestic sewage in an UASB reactor. **Wat. Res.**, v. 23, n. 12, p. 1483-1490, 1989.

BORGES, F.; SELLINS, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, Joinville, v. 17, n. ½, p. 27-32, jan. - dez. 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial [da] União nº 53**, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2016.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial [da] União nº 92**, Brasília, DF, 16 mai. 2011. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol\\_lanceflue\\_30e31mar11.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol_lanceflue_30e31mar11.pdf)>. Acesso em: 13 mar. 2016.

CARON, C. F. et al. Geração de energia no campus a partir da biodigestão anaeróbica. **Tuiuti: Ciência e Cultura**, Curitiba, n. 42, p. 63-73, 2009.

COELHO, S. T. et al. Biogas from Sewage Treatment used to Electric Energy Generation, by a 30 kW (ISO) Microturbine. In: WORLD BIOENERGY CONFERENCE & EXHIBITION, 2006, Suécia.

COELHO, S. T. et al. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (SANEPAR). **Energia produzida a partir de estação de tratamento de esgoto**. Disponível em:<[http://educando.sanepar.com.br/ensino\\_superior/energia-produzida-partir-de-esta%C3%A7%C3%A3o-de-tratamento-de-esgoto](http://educando.sanepar.com.br/ensino_superior/energia-produzida-partir-de-esta%C3%A7%C3%A3o-de-tratamento-de-esgoto)>. Acesso em: abr. 2016.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (SANEPAR). **Experiência da Sanepar no aproveitamento do biogás**. Disponível em:<[http://www.sengers.org.br/site/forca\\_download.php?arquivo=conteudo/arquivo27\\_68.pdf](http://www.sengers.org.br/site/forca_download.php?arquivo=conteudo/arquivo27_68.pdf)>. Acesso em: jun. 2016.

COORDENAÇÃO DE POPULAÇÃO E INDICADORES SOCIAIS (2010). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 1ª ed, Rio de Janeiro, s/ n. p. 26–29 (219). 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: mar. 2016.

COP 21: Por que é importante um acordo contra as mudanças climáticas?. Veja Online, Ciência, 2016, 1p. Disponível em: <<http://veja.abril.com.br/noticia/ciencia/cop-21-por-que-e-importante-um-acordo-contra-as-mudancas-climaticas>>. Acesso em: mar 2016.

FARIA, R. A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto** – Estudo de caso. 2012. 63 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

FEDRIGO, N. S.; GONÇALVES, G.; LUCAS, P. F. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. 2009. 104 p. Relatório de Iniciação Científica – Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

FUESS, L. T. **Qual o valor da vinhaça?** : mitigação de impacto ambiental e recuperação de energia por meio da digestão anaeróbia. 2012. 130 p. Dissertação (Mestrado) – Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, São Paulo, 2012.

GALBIATTI, João A. et al . Estudo qualiquantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 14, n. 4, p. 432-437, abr. 2010.

GERAÇÃO ITAIPU BINACIONAL. **A maior geradora de energia limpa e renovável do planeta**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em: 13 abr. 2016.

GRANATO, E. F. **Geração de Energia Elétrica pela Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça. Bauru**, 2003. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2003.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **O que é saneamento?**. Disponível em:<<http://www.tratabrasil.org.br/o-que-e-saneamento>>. Acesso em: mar. 2016.

IPCC: Retirar investimentos dos combustíveis fósseis para um futuro seguro. 2014. Disponível em: <<http://350.org/pt/ipcc-retirar-investimentos-dos-combustiveis-fosseis-para-um-futuro-seguro/>>. Acesso em: mar 2016.

LEITE, V. D.; POVINELLI, J. Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p.229-232, 1999.

MALAQUIAS, F. G. **Ampliação da estação de tratamento de esgoto – Barueri** uma necessidade eminente. 2004. 56p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2004.

PECORA, V. **Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP: estudo de caso.** 2006. 152 p. Dissertação (Mestrado em Energia), EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PESTANA, M.; GANGHIS, D. **Tratamento de Efluentes.** (Sem data). Apostila. Centro Federal de Educação Tecnológica, CEFET, Bahia.

PLANETA SUSTENTÁVEL. **Glossário.** 2008. Editora Abril. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/glossario/a.shtml>. Acesso em: mar. 2016.

PONTES, P. P. **Reatores UASB aplicados ao tratamento combinado de esgotos sanitários e lodo excedente de filtro biológico percolador.** 2003. 198p. Tese (Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2003.

PORTAL BRASIL. **Entenda como funciona o mercado de crédito de carbono:** cada tonelada de CO<sub>2</sub>e (equivalente) não emitida ou retirada da atmosfera por um país em desenvolvimento pode ser negociada no mercado mundial. 2012. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/04/entenda-como-funciona-o-mercado-de-credito-de-carbono>>. Acesso em: mar. 2016.

SARTI, A.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Desempenho de reatores anaeróbios operados em bateladas sequenciais (escala piloto) no tratamento de esgoto sanitário. **Semana: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 26, n. 2, p. 113-124, jul. - dez. 2005.

SIQUEIRA, J. A. C.; SOUZA, S. N. M.; KOLLING, E. M.. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica.** 2012. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2012.

SOUZA, C. L. **Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB.** 2010. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2010.

VERONEZ, R. A.; GONÇALVES, F. R. Produção de biogás em um reator UASB tratando esgoto sanitário e lodo de descarte de biofiltros aerados submersos.. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6., 2002, Vitória.

VERSIANI, B. M. **Desempenho de um Reator UASB Submetido a Diferentes Condições Operacionais Tratando Esgotos Sanitários do Campus da UFRJ.** Rio de Janeiro, 2005, 78p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

VON SPERLING, M. **Características das águas residuárias:** introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. Belo Horizonte, Editora UFMG, 1995.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil.** Rio de Janeiro. 2009. 97 p. Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2009.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de cascavel para a geração de energia elétrica.** 2012. 52 p. Dissertação (Mestrado em Energia e Agricultura) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.