

Seminário FESPSP “Cidades Conectadas: os desafios sociais na era das redes”

17 a 20 de outubro de 2016

GT 9 - Meio Ambiente e Sociedade

A utilização do biogás do processo de tratamento de esgoto para a geração de energia

Lucas A. Vulcano¹

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Melissa M. Nakazono²

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Resumo

Os gases provenientes do processo de tratamento de esgoto apresentam um grande potencial energético, o qual é bastante utilizado em inúmeros países, porém pouco difundido no Brasil. Quando utilizado, esse método de produção de energia traz consigo vantagens, tais como reduções de custos operacionais das Estações de Tratamento de Esgotos (ETE), suprimindo em parte ou ao todo os gastos com energia elétrica, além de uma redução significativa no volume de lodo residual destinado ao aterro sanitário. Este artigo tem como objetivos analisar a viabilidade técnica da implantação da tecnologia geradora de energia através do uso do biogás na Região Metropolitana de São Paulo, além de analisar a redução dos impactos ambientais.

Palavras chaves: Biogás. Lodo. Energia.

¹ Engenheiro Civil, la.vulcano@gmail.com

² Engenheira Civil; melmayumijps@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da civilização humana, o homem, a fim de se manter vivo, procurou meios pelos quais poderia gerar energia. Relatos dizem que os homens das cavernas utilizavam o fogo para o feitiço de sua alimentação, para se aquecer e se proteger. Porém, com o avanço e desenvolvimento da espécie humana, as fontes existentes foram sendo aprimoradas e novas foram surgindo.

Atualmente, o desenvolvimento de um país está relacionado, dentre outros fatores, à autossuficiência energética. O Brasil, por ter um sistema hídrico invejável, permitiu a implantação de usinas hidrelétricas, que são responsáveis por 65,2% da produção de energia elétrica no País.

Porém, com o aprimoramento e surgimento de novas tecnologias, hoje já é possível também obter energia do biogás resultante do lodo provindo do tratamento dos esgotos.

O biogás é uma fonte alternativa de energia, proveniente da decomposição anaeróbia da matéria orgânica do processo do tratamento do esgoto domiciliar e rural, e também do processo de decomposição em aterros sanitários. No estado do Paraná, em algumas propriedades rurais com criações de suínos, bovino e aves, os dejetos são encaminhados para os biodigestores para a obtenção do biogás para conversão em energia elétrica, que é utilizada para o consumo, além de também ser vendida à concessionária.

Esse processo de geração de energia é inesgotável, pois esgotos jamais deixarão de existir. Com o avanço da coleta e tratamento dos esgotos urbanos, o meio ambiente será beneficiado, além de resultar em uma maior quantidade de esgoto tratado e conseqüentemente maior geração de biogás, contribuindo assim com a disseminação do uso desse gás como fonte geradora de energia elétrica, tanto para a autossuficiência da estação de tratamento quanto para a introdução na rede elétrica conforme Centro Nacional de Referência de Biomassa (CENBIO, 2001).

2 REVISÃO DA LITERATURA

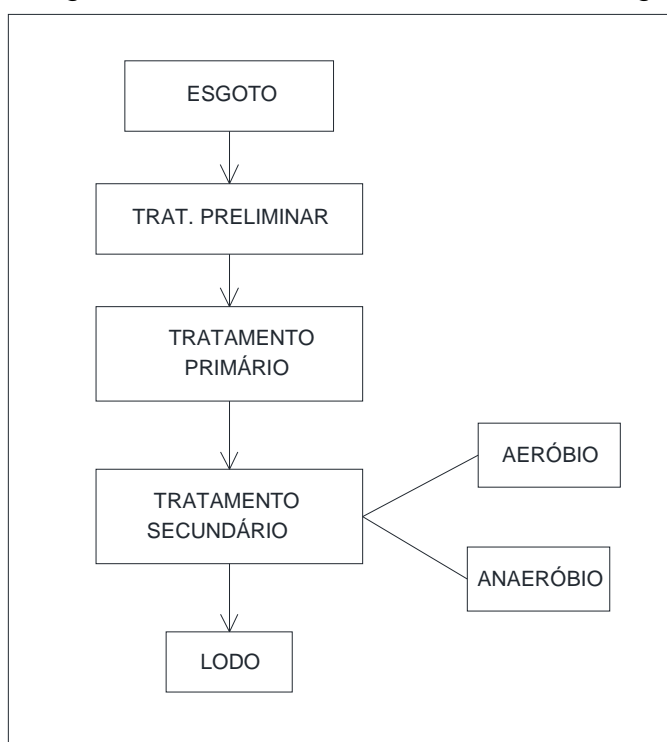
2.1 TRATAMENTO DO ESGOTO SANITÁRIO

Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água, 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos. Devido a essa fração de 0,1%, há necessidade de se tratar os esgotos, conforme Von Sperling (1996).

Um dos principais parâmetros indicadores de poluição do despejo é a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a qual mede o oxigênio consumido pelas bactérias de vida livre para estabilizar a matéria orgânica. De acordo com Giansante (2015), a DBO média dos esgotos sanitários é 300mg/litro.

Os processos relacionados ao tratamento de esgoto são mostrados no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 –Processo de tratamento de esgoto



Fonte: Os autores.

A primeira etapa do processo de tratamento de esgoto é o tratamento preliminar, que consiste em um processo físico formado primeiramente por gradeamentos e sedimentação. O gradeamento é composto por duas etapas, a primeira para reter materiais grosseiros e a segunda para reter materiais finos.

Em seguida há o processo de desarenação para a retirada da areia por sedimentação, nos quais os grãos de areia se depositam no fundo do tanque enquanto a matéria orgânica de sedimentação mais lenta é direcionada para a etapa seguinte. No percurso entre os coletores até à estação de tratamento, é levada areia juntamente com o esgoto, essa podendo danificar às tubulações e sistemas de bombeamento, sendo necessária a retirada desse material. Caso não seja removida a areia, ocasionará abrasão e obstrução de equipamentos e tubulações.

Após a remoção da areia, o fluido passa por um medidor de vazão, podendo ser desde uma calha Parshall à medidor eletrônico. A vazão obtida nessa etapa mostra a quantidade de esgoto a ser tratado.

A segunda etapa do processo de tratamento de esgoto é o tratamento primário, no qual o efluente (esgoto) passa com uma velocidade muito baixa, permitindo que os sólidos se depositem no fundo. Esse material acumulado no fundo do tanque primário é denominado de lodo primário bruto, que é removido do tanque por meio de raspadores de fundo, assim encaminham este material para uma tubulação de saída, que faz sua remoção.

A terceira etapa do processo de tratamento de esgoto é o tratamento secundário, que consiste na remoção da matéria orgânica por meio do processo bioquímico, no qual há a oxidação da matéria orgânica através de bactérias, fungos e protozoários, pelo processo biológico aeróbio ou anaeróbio.

Os principais tratamentos biológicos são: lodos ativados (aeróbio) e tratamento anaeróbio.

O tratamento de lodos ativados é um processo biológico aeróbio que, ocorre com a presença de oxigênio (O_2), constituído de duas etapas: tanque de aeração e decantador secundário. O efluente passa primeiramente pelo tanque de aeração por insuflação de ar ou aeração mecânica que consiste em manter contato entre a biomassa, a matéria orgânica em suspensão e o oxigênio, para que haja a oxidação da matéria orgânica e a reprodução dos microrganismos. Nesta etapa, há o retorno de parcela do lodo provindo do decantador secundário. Segundo Von Sperling (1996), a massa microbiana (biomassa) envolvida no processo aeróbio, é constituída

principalmente por protozoários, microrganismos e bactérias, principais responsáveis pela oxidação da matéria orgânica.

A matéria orgânica é formada por açúcares e reage com o oxigênio, produzindo gás carbônico, água e energia.

Em seguida, o efluente é encaminhado para o decantador secundário, no qual o material resultante no fundo do decantador secundário é chamado de lodo ativado, formado por bactérias ainda ávidas por matéria orgânica. Esse lodo retorna ao tanque de aeração para que haja um aumento de concentração de microrganismos para decompor a matéria orgânica com mais eficiência (recirculação do lodo).

Nesta etapa, nota-se a clarificação do efluente, que pode ser lançado em corpos d'água (rios, córregos, canais, represas e mar) ou pode ser reutilizado (água de reuso).

A vantagem da utilização deste sistema, é que requer menores áreas e há maior eficiência na remoção da matéria orgânica. Porém, exige mão de obra especializada de manutenção e operação, além de elevado consumo de energia elétrica.

A outra alternativa de tratamento secundário é o tratamento anaeróbio (sem a presença de oxigênio). Nesse sistema os microrganismos consomem a matéria orgânica (açúcares), processo onde há a oxidação dessa matéria orgânica, liberando o biogás: metano, gás carbônico e energia. O tratamento anaeróbio pode ser realizado em lagoas anaeróbias, tanque sépticos ou reatores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB).

Nesta revisão da literatura será contemplado apenas o reator UASB desenvolvido na Holanda no final dos anos 1970, devido a sua maior taxa de produção de biogás em relação aos outros dois sistemas supracitados.

O reator UASB apresenta baixo custo, simplicidade operacional, baixa produção de sólidos, além do clima tropical que favorece o crescimento microbiano (VALENTE, 2015). Como exemplo tem-se a ETE Rio Preto, em São José do Rio Preto (SP) e a ETE Ouro Verde (PR).

O biodigestor UASB é caracterizado pela entrada do afluente pela base do reator, onde existe um leito de lodo, e logo acima uma manta de lodo, ocorrendo a biodigestão, resultando na formação do biogás. O sistema se auto mistura pelo movimento ascendente das bolhas do biogás e pelo fluxo do afluente no reator. No

separador de fases, há um compartimento de acumulação de biogás e coleta do efluente. O biogás coletado no topo do reator UASB, segue para limpeza e tratamento com a finalidade de corrigir as propriedades do biogás, que contém água e dióxido de carbono, os quais prejudicam o processo de queima, tornando-o menos eficiente.

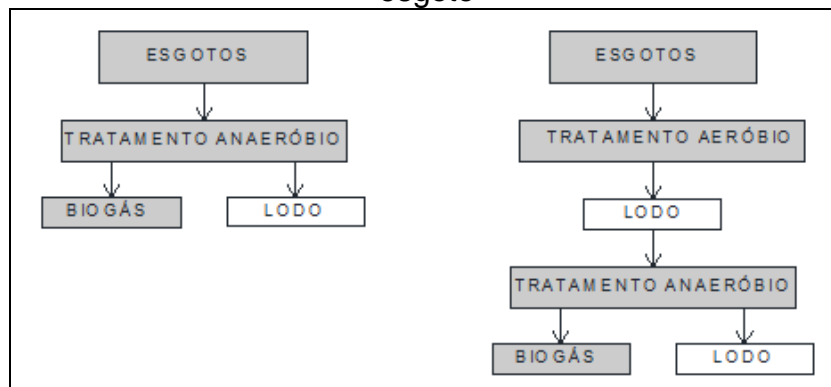
No processo de tratamento de esgoto há a geração de um subproduto, o lodo, material sólido como areia, espuma, lodos primário e secundário. Constituído por 5% de sólidos e 95% de água, necessita de processo de tratamento antes de ser descartado em aterros, como acontece no Brasil.

O tratamento de lodo consiste em: adensamento, estabilização, desaguamento, higienização e disposição final.

Existem diversos tratamentos para estabilização do lodo, como: digestão anaeróbia, digestão aeróbia, processos químicos e físicos. Apenas na digestão anaeróbia do lodo é possível obter o biogás. O lodo proveniente do reator UASB não necessita de estabilização (digestão), pois este já se encontra estabilizado e necessita apenas da fase de desaguamento (VALENTE, 2015).

No processo de lodos ativados, o lodo produzido necessita de estabilização, com o objetivo de conversão parcial da matéria orgânica em líquidos, sólidos dissolvidos, subprodutos gasosos e redução dos sólidos secos do lodo (JORDÃO; PESSÔA, 2009). Pode-se visualizar a obtenção do biogás no Fluxograma 2.

Fluxograma 2- Produção de biogás a partir de diferentes opções de tratamento de esgoto



Fonte: adaptado de Valente (2015, p.16).

Segundo Andreoli *et al.* (2001, *apud* Lobato, 2011, p.69), o gerenciamento do lodo é uma atividade de alto custo e complexidade, que se for mal executada traz danos ao meio ambiente. Sua composição possui diversos poluentes como: metais pesados, poluentes orgânicos persistentes e organismos patogênicos ao homem, conforme Bettioli *et al.* (2008). O volume de lodo gerado em uma estação de tratamento corresponde a aproximadamente 1% a 2% do volume de esgoto tratado, no entanto, o custo de tratamento e disposição final do lodo pode atingir 20 a 60% do custo operacional da estação de tratamento.

2.2 BIOGÁS

Durante o processo de oxidação da matéria orgânica há a liberação de biogás, constituído por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), estando seu poder calorífico diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa, conforme Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) (2004, *apud* COSTA, 2006, p.36).

2.2.1 Histórico

Existem dados, que datam o primeiro contato com a energia gerada pelo biogás no século 10 a.C, na região de Assíria, onde utilizavam o gás para aquecer os banhos. Em 1808, após milhares de anos da descoberta sobre o biogás, o químico inglês Humphry Davy, anunciou que a partir da digestão anaeróbica do esterco bovino, era possível obter uma porcentagem de metano dentre todos os gases gerados. No ano de 1859 na Índia, foi criado o primeiro aparelho biodigestor. Passados 25 anos, Louis Pasteur idealizou na academia de ciências a ideia de que esses gases poderiam ser utilizados com a finalidade de aquecimento e iluminação, ocorrendo assim na Inglaterra, em 1895, a utilização do gás gerado em uma estação de tratamento de esgotos, para alimentar lâmpadas de uma rua na cidade de Exter, de acordo com Bley (2015).

Ainda segundo Bley (2015), com a evolução da microbiologia decorrente na década de 1930, facilitou-se os estudos relacionados as bactérias presentes na decomposição anaeróbica, permitindo assim, que fosse possível entender as condições para a produção do metano. Vinte sete anos mais tarde, a geração de combustível gasoso com o uso de esterco de galinha por Harold Bates.

O uso do biogás também teve repercussão no período da Segunda Grande Guerra e Pós-Guerra. Segundo Jordão e Pessôa (2009), alguns países europeus, em destaque a Alemanha, utilizaram o gás para a combustão de motores, produzindo energia elétrica e energia térmica. Essa energia era proveniente dos gases obtidos através da biodigestão dos esgotos. Existiam naquela época estações situadas em cidades como Munich, Essen, Stuttgart, Halle e Berlin, as quais eram fonte de metano.

Existem hoje, como afirma Bley (2015), cerca de 1.483 usinas no mundo que são capazes de produzir energia utilizando o biogás. O Japão lidera o ranking, seguido pela Europa, China e Estados Unidos.

No Brasil, de acordo com Bley (2015), nos anos de 1970, na indústria agropecuária, com o objetivo de aumentar de produtividade, houve a introdução de novas tecnologias para desenvolvimento da genética vegetal e animal, direcionada para o confinamento de animais. Os dejetos gerados precisavam ser direcionados, assim foram construídos os biodigestores para receber esses dejetos, porém, recebiam também as águas das chuvas, que provocavam a interrupção do processo de biodigestão, devido ao choque térmico (redução da temperatura pode acarretar a inibição dos microrganismos), resultando em menor tempo de detenção hidráulica. Um outro agravante era o uso de detergentes à base de soda cáustica, muito comum na época para efetuar a limpeza das instalações. Esses detergentes não se degradavam e eram transportados para os biodigestores, comprometendo a população de bactérias.

Devido à falta de conhecimento no processo de biodigestão, fez com que os biodigestores fossem abandonados por produtores e investidores. Outro motivo para o abandono, foi que nos anos 1970, o valor do biogás estava vinculado ao valor dos derivados do petróleo, e com a primeira crise internacional de preços, esse desapareceu.

Em 1988, com o avanço da legislação ambiental, as agroindústrias adotaram o sistema de tratamento de dejetos em lagoas anaeróbias, seguidas de lagoas facultativas, porém, nem sempre eficientes para altas cargas orgânicas, como os dejetos de animais estabulados, sangue e vísceras.

Nos anos de 1990, a realização da Conferência Rio-92, a questão ambiental ganhou impulso, conforme afirma Bley (2015), no qual uma das questões da Conferência era reduzir a emissão de gases de efeito estufa, gerado a partir de

ações humanas como: queima de combustíveis fósseis, atividades agropastoris, lixões e aterros sanitários. Em 1997, para atender às regras do Protocolo de Kyoto, foram publicadas as metodologias de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), com o objetivo de conter ou mitigar as emissões dos gases poluentes. Essas metodologias orientaram o uso do biogás gerado nos aterros e na digestão anaeróbia, estabelecendo que a destruição do gás metano poderia ser dada pela simples queima do biogás ou também poderia ser usada para a conversão em energia. Devido à complexidade do uso do biogás para a geração de energia, optou-se pela queima em *flares* (queimador de gás).

A partir de meados do ano de 2000, o biogás passou a ser de passivo ambiental à fonte energética, despertando interesses em pesquisadores e da indústria automobilística brasileira.

Em 2012, foi aprovada a Resolução Normativa N°482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de incentivo à micro e minigeração distribuída. Essa central microgeradora/minigeradora de energia, ao injetar energia na rede de distribuição, gera créditos para que posteriormente sejam resgatados.

2.2.1.1 Aproveitamento energético em estações de tratamento de esgoto (ETE)

No ano de 2002, o Centro Nacional de Referência de Biomassa (CENBIO), realizou o ENER-G-BIOG, um projeto piloto para geração de energia a partir do biogás do processo de tratamento de esgoto na maior ETE da América Latina, a ETE Barueri. O objetivo desse projeto, com a utilização do biogás proveniente da digestão anaeróbia dos lodos, era converter 30% da energia contida no biogás em gerar energia elétrica e o restante ser utilizado para aquecimento do biodigestor, além de realizar um comparativo entre microturbina e motor com mesma faixa de potência.

Segundo Costa (2006), a produção média de biogás era de 24.000m³ de biogás/dia e com um poder calorífico inferior (PCI) de 20,2MJ/Nm³, e uma composição média de 62,5% de metano, e as barreiras encontradas na realização desse estudo na época foram:

- a) necessitava de importação de alguns materiais e equipamentos para a captação, tratamento e compressão do biogás;

b) procedimentos de operação e manutenção demandavam mão de obra especializada, acarretando atraso na operação da instalação, principalmente quando um equipamento é importado e o representante local não dispõe de peças de reposição em estoque;

c) faltava um mercado amplo e consolidado com equipamentos específicos para o aproveitamento energético do biogás.

A Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), instalou na ETE Ouro Verde, em 2008, uma unidade piloto de energia renovável para gerar energia elétrica por meio de motor de combustão interna. Nessa unidade é utilizado o reator UASB e produz anualmente cerca de 50 mil m³ de metano por dia, segundo Silva (2015).

Já a ETE Arrudas, a maior do estado de Minas Gerais, é operada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), desde 2011, produz o biogás proveniente do tratamento da fase sólida. O processo de tratamento é de lodo ativado convencional, nos quais 63% do gasto energético da companhia deve-se aos reatores de lodos ativados, 20% com o tratamento primário e gerenciamento do lodo, sendo também a maior ETE consumidora de energia da COPASA (ROSA,2013).

Conforme Gaio (2013 *apud* Silva, 2015, p.52) no ano de 2012, a ETE Arrudas produziu em média 12.430Nm³/dia de biogás e 13MWh/mês de energia, suprimindo 53,2% do consumo de energia.

Desde março de 2011, a ETE Ribeirão Preto, utiliza o biogás dos digestores anaeróbios de lodo, produzindo cerca de 14.653kWh/dia, conseguindo suprir 51% do consumo energético da planta, segundo dados fornecidos pela Ambient S.A.

2.2.1.2 Aproveitamento energético em aterros

Conforme Figueredo (2011), aterro sanitário consiste na técnica de disposição final dos resíduos urbanos no solo através do seu confinamento, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais.

Durante a decomposição da matéria orgânica são produzidos o chorume e o biogás.

O sistema de captação do biogás é composto por drenos horizontais e verticais, sopradores, filtros para remoção de material particulado e tanques separadores de condensado (ICLEI,2009).

Aterros com aproveitamento do biogás:

a) Aterro Sanitário Municipal Bandeirantes: com uma área de 140 hectares, localizado no km 26 da Rodovia dos Bandeirantes, em Perus- SP. O projeto de captação de biogás teve início em 2003, com um potencial instalado de 22 MW, com motores ciclo Otto importados acoplados à geradores. Está desativado desde 2007, porém ainda com uma produção de biogás prevista até 2027.

b) Aterro Sanitário São João: com área de 84 hectares, localizado na Estrada de Sapobemba, km 33, em São Mateus, zona leste da cidade de São Paulo. A captação de biogás iniciou-se em 2005, com capacidade de geração de 22 MW (ICLEI,2009).

c) Aterro de Gramacho: localizada em Duque de Caxias, no estado do Rio de Janeiro, durante mais de 30 anos foi o principal destino de milhões de toneladas de resíduos da cidade do Rio de Janeiro e municípios vizinhos. Fechado em 2012, não recebe mais resíduos, mas continua a gerar gases, fornecendo biogás para a Refinaria Duque de Caxias (REDUC), da Petrobrás, desde outubro de 2013. A REDUC consome uma média de 49 mil m³/ dia de biogás, o que corresponde cerca de 2,5% do seu consumo diário de gás natural. O biogás captado no aterro é purificado e transportado por um gasoduto de 6km até a refinaria.

d) Aterro de Seropédica: com as operações iniciadas em 2011, está localizado no município de Seropédica, no estado do Rio de Janeiro, ocupa uma área de 222,6 hectares (ABREU,2014). O projeto será empreendido em três fases: a primeira abrange a instalação do sistema de coleta de gás de aterro e do *flare*. Na segunda fase será instalado o sistema de geração de energia, e na terceira haverá a implantação de planta de tratamento do biogás para a distribuição através de uma rede de gás natural, conforme dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013).

2.2.1.3 Aproveitamento energético através de resíduos agropecuários

Os resíduos agropecuários (dejetos) provindos de animais mantidos em confinamento, sob condições anaeróbias durante a estocagem e tratamento, produzem o metano. Os principais fatores que influenciam na produção de biogás são: o número de animais, a taxa de produção por animal e o manejo dos dejetos, segundo Zanette (2009).

Um exemplo de produção de biogás é a Granja Haacke, localizada no município de Santa Helena, no estado do Paraná, que desde 2013, produz cerca de 1.000m³ de biogás diariamente provindo da digestão anaeróbia dos resíduos de 84 mil aves e 750 bovinos de corte. O biogás foi purificado para ser utilizado como combustível veicular, transformando-se em biometano com cerca de 98% de metano na sua composição e uma produção de 700m³/dia. (BLEY, 2015). O biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris a ser comercializado em todo território nacional, deve atender às especificações da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

2.2.1.4 Aproveitamento energético para combustível veicular

O biometano como combustível veicular, tem grande potencial, especialmente na ausência de emissões de monóxido de carbono e nitrogênio, conforme *European Biofuels Technology Platform* (EBPT) (2014, *apud* Valente, 2015, p.136).

É necessário purificar o biogás para a retirada dos gases traço (gases em pequenas quantidades) como o ácido sulfídrico (H₂S) que combinado com o vapor d'água origina o ácido sulfúrico, altamente corrosivo. O dióxido de carbono (CO₂) causa o empobrecimento do poder calorífico do metano.

No ano de 2015, foi aprovada uma regulação para comercialização e injeção de biometano na rede de gás natural ou uso veicular. Porém, esta regulação exclui o biometano obtido a partir de resíduos sólidos urbanos ou resíduo de esgotamento sanitário. A resolução N° 23 da ANP/2012, estabelece que o transporte de biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos ou de resíduos de esgotamento sanitário poderá ser feito somente por meio de veículos transportadores de gás comprimido e para realização de uso experimental.

2.2.2 Formação do Biogás

Conforme Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ,2010), a formação do biogás, inicia-se com a hidrólise, em que os compostos orgânicos complexos, tais como carboidratos, proteínas e lipídios são decompostos em substâncias menos complexas como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos. Em seguida, ocorre a acidogênese (fase acidogênica) onde os compostos são

transformados em ácidos graxos de cadeia curta (ácido propiônico e butírico) e outros compostos (ácido láctico, álcoois, etc). No processo de acetogênese ocorre a formação de ácido acético, hidrogênio e oxigênio. Deve-se observar a concentração de hidrogênio, pois em uma concentração muito elevada, inibem a etapa posterior (metanogênese).

A metanogênese é a etapa seguinte, no qual as *arqueas* metanogênicas, convertem o ácido acético, o hidrogênio e o oxigênio em metano.

Os fatores como oxigênio, temperatura, pH, carbono/nitrogênio, substrato a ser utilizado e substâncias inibidoras, podem influenciar no processo de decomposição da matéria orgânica e em consequência, na quantidade de metano. Os parâmetros de processo como tempo de detenção hidráulica, agitação e temperatura, também influenciam na formação do metano.

O potencial do biogás está relacionado à quantidade de metano em sua composição, fator que determina o seu poder calorífico inferior (PCI). O poder calorífico inferior do metano é de $35,9 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ e do biogás com 60% de metano é $21,5 \text{ MJ.Nm}^{-3}$, correspondendo a 67% do poder calorífico do gás natural.

2.2.3 Armazenamento do Biogás

O armazenamento do biogás é realizado através de gasômetro. Esse pode ser utilizado tanto para armazenagem, quanto para regular a vazão do gás, pois pode ser de baixa pressão ou pressurizado. Isso se dá devido a produção irregular do biogás, que está relacionada diretamente às variações das características do esgoto.

2.2.4 Tratamento e Limpeza do Biogás

No Brasil, ainda não existe norma sobre o tratamento e armazenamento do biogás gerado em ETEs. A Norma Alemã Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft (DWA) M361/2011, segundo Valente (2015), o biogás deve receber tratamento conforme o tipo de utilização deste, mas sendo indispensável o processo de desumidificação, dessulfurização e eliminação dos siloxanos.

2.2.5 Tecnologias para conversão do biogás em energia elétrica

Atualmente é possível gerar energia provinda do biogás utilizando-se de algumas tecnologias. A geração da energia ocorre pela conversão da energia

química presente nas moléculas dos gases em energia mecânica, através de um processo de combustão controlada, onde existe a mistura de ar e combustível. Dessa forma a energia mecânica ativa um alternador que a converte em energia elétrica, conforme afirma Costa (2006). Existem dois tipos de tecnologias disponíveis no mercado para a utilização do biogás como combustível, sendo as turbinas a gás e os motores de combustão interna, denominado de Ciclo Otto e Diesel.

Nas ETEs onde utiliza-se do biogás para a geração de eletricidade, as turbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo Ciclo Otto, são os mais utilizados para esse tipo de conversão energética, como diz Coelho et al. (2004 apud VALENTE, 2015, p.53).

3 ASPECTOS AMBIENTAIS

Com o advento da Revolução Industrial, nos séculos XVIII e XIX, a humanidade foi beneficiada com a substituição da força braçal por máquinas, desenvolvimento de transportes rápidos e até mesmo aumentou a expectativa de vida da população do planeta. No entanto, para esse desenvolvimento foi necessário a queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural.

O aquecimento global passou a ser diagnosticado no ano de 1979, quando foi realizada a Primeira Conferência Mundial sobre o Clima, no qual se introduziu o conceito de que ações humanas podem afetar potencialmente o clima e trazer consequências irreversíveis à vida no planeta.

A partir dos anos de 1980, o mundo começou a se preocupar com o que aconteceria no futuro, sendo assim, em 1988 criada a World Meteorological Organization (WMO) e o Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) com o objetivo de fornecer informações científicas, técnicas e socioeconômicas relacionadas às mudanças climáticas globais, segundo Costa (2006).

Após várias reuniões com representantes de países de todos os continentes, em 1997, foi firmado um acordo internacional – Protocolo de Kyoto- com o objetivo de reduzir os gases de efeito estufa para os principais países emissores. Com a entrada em vigor deste Protocolo, em 2005, os países listados comprometiam-se a reduzir suas emissões entre os anos de 2008 e 2012, em aproximadamente 5% em relação aos níveis de 1990. Também trazia a opção dos países listados compensarem suas emissões através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), através de projetos sócio/ambientais sustentáveis implementados nos países

em desenvolvimento, conforme Costa (2006). Os países em desenvolvimento, a partir da implantação de projetos que comprovadamente conseguiram reduzir as emissões de GEE ou sequestrar CO₂ atmosférico, podiam gerar fontes adicionais de receita através de Certificados de Redução de Emissões (CRE), conhecido como Créditos de Carbono e assim vendê-los à países listados.

Créditos de carbono são certificados emitidos quando ocorre a redução de emissão dos GEE; por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono equivale um crédito de carbono. O dióxido de carbono (CO₂) é o composto de referência por estar presente naturalmente na atmosfera e por ser o GEE emitido em maior quantidade para a atmosfera.

Com relação ao metano, esse gás combustível é resultante da decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Conforme El-Fadel e Massoud (2000), 70% das emissões de metano são provenientes de ações humanas e 30% de fontes naturais.

No Brasil, no ano de 2005, as emissões de metano do setor de tratamento de resíduos correspondem a 10%, conforme o Ministério de Ciência e Tecnologia. De acordo com Pecora (2006), para minimizar o impacto ambiental provocado pelo metano, o biogás produzido nas estações de tratamento é queimado em *flares*, convertendo-o em dióxido de carbono (CO₂), que é 21 vezes menos nocivo, se comparado ao metano (CH₄).

No processo de tratamento de esgoto é gerado um subproduto, o lodo, no qual contém matéria orgânica e patógenos. Para que não haja danos ao ambiente e à saúde pública, o lodo deve ser gerenciado de forma adequada para que não comprometa os resultados obtidos com o esgotamento sanitário, segundo Lobato (2011).

O lodo quando gerenciado de forma adequada torna-se um recurso energético, ou ainda, pode ser usado como agregado leve, adição de concreto ou fertilizante, de acordo com Bettioli *et al.* (2008). Conforme Rosa (2013), no Brasil, a prática mais comum pelas empresas de saneamento é o envio do lodo para aterros sanitários, porém quando o lodo é utilizado na geração de biogás, esse reduz de volume ocupando menores áreas nos aterros sanitários, dessa forma minimizando os impactos ambientais

3 ESTUDO DE CASO

A ETE – Ribeirão Preto (Fotografia 1), localizada no interior do estado de São Paulo, sob contrato de concessão entre a Prefeitura Municipal e a Ambient Serviços Ambientais de Ribeirão Preto S/A em operação desde novembro de 2002, atende uma população de 560.000 habitantes, totalizando 110.000 m³ de esgoto por dia. Com a necessidade de reduzir gastos com energia elétrica, foi implantado um sistema de geração de energia provinda do uso de biogás, resultante da digestão anaeróbia dos lodos primários e secundários.

Fotografia 1 – Vista Panorâmica da ETE Ribeirão Preto



Fonte: Ambient S.A., 2014.

O sistema de tratamento utilizado é a tecnologia de lodo ativado convencional e a digestão anaeróbia de lodos. Conforme dados fornecidos pelo Eng. Carlos Roberto Ferreira, o gasto com esse sistema de tratamento representava aproximadamente 40% dos custos operacionais da ETE, sendo que no ano de 2014 foram consumidos 10.409.364 kWh.

Em 2011 iniciou-se o projeto de geração de energia provinda do biogás, resultante do tratamento anaeróbio do lodo. Com um investimento de 5 milhões de reais, foram instalados dois motogeradores, Ciclo Otto de quatro tempos, com capacidade de gerar 752 kW/h, Trafo de 2000 kW e sistema Unidade de Transmissão Remota (UTR) possibilitando o gerenciamento pela concessionária local da energia gerada pela ETE. Porém foi solicitado pela ANEEL que a concessionária local de energia fizesse a substituição e melhorias na linha e alimentador de energia elétrica da ETE.

Os motogeradores são fornecidos pela Guasco do Brasil S/A, atualmente Siemens, a qual foi responsável pela instalação e *start up* dos equipamentos, além da prestação de serviço de manutenção preventiva durante treze anos, fator que viabilizou a implantação do projeto do biogás.

A concepção do funcionamento dos motogeradores previa que no horário de pico, entre as 17 e 20 horas, o kWh de energia elétrica é mais caro, sendo assim utilizam-se os dois motores e nos outros horários apenas um deles.

Dados da Ambient S.A., mostram que no ano de 2014 a tecnologia implantada gerou 51% da energia necessária para o suprimento da ETE, sendo que a média diária de energia elétrica consumida pela ETE era de 28.915 kW/h e os motogeradores obtiveram a média diária de 14.653 kW/h.

Em relação ao lodo acumulado dentro dos biodigestores pelo período de 12 dias, utilizam-se do calor trazido pela água que resfria os motores, assim promovendo a temperatura ideal, entre 35° e 37°C, para que os microrganismos se reproduzam e mantenham rendimento elevado de gás.

Os dados da produção de biogás, foram cedidos pela Ambiente. S.A., conforme demonstrado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Dados da ETE Ribeirão Preto

População atendida	hab.	560.000
Volume de esgoto tratado	m ³ /dia	110.000
DBO do esgoto de entrada	mg/l	261
DQO do esgoto de entrada	mg/l	580
Eficiência de remoção da carga orgânica	%	96
Volume de gás gerado	Nm ³ /dia	7.000
Volume de resíduo gerado	ton/dia	50

Fonte: Ambient S.A., 2014.

Tabela 2 – Dados de 2014 da central de geração de energia do biogás - ETE Ribeirão Preto

Mês	Consumo Total	Energia produzida (kWh)Biogás	Rendimento (kWh/Nm ³)	Energia produzida (%) Biogás
Janeiro	884.402	428.941	2,22	49
Fevereiro	801.114	394.733	5,78	49
Março	848.767	445.649	5,90	53
Abril	811.608	382.438	5,62	47
Maió	880.535	466.804	2,60	53
Junho	862.033	458.511	2,31	53
Julho	863.005	395.372	2,35	46
Agosto	871.734	434.683	2,31	53
Setembro	867.741	449.705	2,26	52
Outubro	914.196	450.996	2,21	49
Novembro	897.123	490.659	2,19	55
Dezembro	907.106	476.594	2,21	53
TOTAL	10.409.364	5.275.085	2,63	51%

Fonte: Ambiente S.A., 2014.

Com os dados fornecidos pela Ambient Serviços Ambientais de Ribeirão Preto S/A, é possível prever a geração de energia que pode ser gerada nas estações de tratamento de esgoto que atendem a Região Metropolitana de São Paulo, que contempla o mesmo sistema utilizado pela ETE Ribeirão Preto, ou seja, o processo de lodos ativados.

Pode-se obter um cenário de estimativa de quantidade de biogás e em consequência a quantidade de energia gerada (Tabela 3), a partir do Censo de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), adotando-se a hipótese de 100% da população (21.090.792 habitantes) com acesso à rede de coleta e tratamento de esgoto.

Tabela 3 – Estimativa de produção de biogás para a Região Metropolitana de São Paulo

Dados	unid	ETE Ribeirão Preto	RMSP
População atendida	hab.	560.000	21.090.792
Volume de esgoto tratado	m ³ /dia	110.000	4.142.834 (1)
Volume de gás gerado	Nm ³ /dia	7.000	263.635 (2)
Quantidade de resíduo gerado	ton/dia	50	1.883 (3)
Energia Gerada	kwh/mês	439.590	16.555.895 (4)
Energia Gerada	kwh/ano	5.275.085	198.670.741 (5)

Fonte: Os autores.

O volume de esgoto estimado na Região Metropolitana de São Paulo, é dado pela Equação 1.

$$V_{\text{esgoto tratado}} = \frac{110.000 * 21.090.792}{560.000} = 4.142.834 \text{ m}^3/\text{dia} \quad (1)$$

O volume de gás gerado é demonstrado na Equação 2.

$$V_{\text{gás gerado}} = \frac{7.000 * 21.090.792}{560.000} = 263.635 \text{ Nm}^3/\text{dia} \quad (2)$$

A quantidade de resíduo (lodo) gerado, é dada pela Equação 3.

$$Q_{\text{resíduo gerado (lodo)}} = \frac{50 * 21.090.792}{560.000} = 1.883 \text{ ton}/\text{dia} \quad (3)$$

As Equações 4 e 5, demonstram a geração de energia obtida no período.

$$Q_{\text{energia gerada/mês}} = \frac{439.590 * 21.090.792}{560.000} = 16.555.895 \text{ kWh/mês} \quad (4)$$

$$Q_{\text{energia gerada/ano}} = 16.555.895 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} * 12 \text{ meses} = 198.670.741 \text{ kWh/mês} \quad (5)$$

Utilizando como referência a tarifa de energia da AES Eletropaulo (Tabela 4) para poder público, nas modalidades ponta e fora de ponta, pode-se calcular o valor monetário da energia gerada com o uso do biogás.

Tabela 4 – Tarifa de energia elétrica

Tarifas aplicadas a clientes em Alta e Média Tensão de fornecimento - Grupo A						
MODALIDADE TARIFÁRIA	SUBGRUPOS					
	A2 (88 a 138kV)			A3a (30 a 44kV)		
	Tarifa de uso do Sistema de Distribuição (TUSD)		Tarifa de Energia (TE)	Tarifa de uso do Sistema de Distribuição (TUSD)		Tarifa de Energia (TE)
	Demanda (R\$/kW)	Energia (R\$/kWh)	Energia (R\$/kWh)	Demanda (R\$/kW)	Energia (R\$/kWh)	Energia (R\$/kWh)
TARIFA HORÁRIA AZUL						
PONTA	6,09	0,07091	0,36024	12,38	0,07763	0,36024
FORA PONTA	3,83	0,07091	0,22596	7,74	0,07763	0,22596
ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA PONTA	12,18	-	-	24,76	-	-
ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA FORA PONTA	7,66	-	-	15,48	-	-
ENERGIA REATIVA EXCEDENTE	-	-	0,23715	-	-	0,23715
TARIFA HORÁRIA VERDE						
PONTA	-	-	-	7,74	0,37784	0,36024
FORA PONTA	-	-	-		0,07763	0,22596
ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA	-	-	-	15,48	-	-
ENERGIA REATIVA EXCEDENTE	-	-	-	-	-	0,23715
TARIFA CONVENCIONAL BINÔMIA						
INTEGRAL	-	-	-	-	-	-
ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA	-	-	-	-	-	-
ENERGIA REATIVA EXCEDENTE	-	-	-	-	-	0,23715

Fonte: AES Eletropaulo (2016).

Apresenta-se uma simulação com o valor monetário que as ETEs da Região Metropolitana estariam economizando caso venham a utilizar o biogás para a geração de energia. As ETEs operam com duas modalidades tarifárias, sendo a de ponta das 17horas às 20horas e a fora de ponta os demais horários, sendo obtidas as taxas de utilização conforme demonstrados Equações 6 e 7.

$$\text{Horário de ponta equivale} = 3\text{horas} / 24\text{horas} = 0,125 \text{ (12,5\%)} \quad (6)$$

$$\text{Horário fora de ponta equivale} = 21\text{horas} / 24\text{horas} = 0,875 \text{ (87,5\%)} \quad (7)$$

Para o cálculo monetário anual nos horários de ponta e fora de ponta, não foram considerados os impostos.

Dessa forma, obtém-se os valores monetários anuais, conforme as Equações 8 e 9.

Valor anual de ponta:

$$0,125 * 198.670.741 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} * R\$(0,07763 + 0,36024) = R\$10.837.995,67/\text{ano} \quad (8)$$

Valor anual fora de ponta:

$$0,875 * 198.670.741 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} * R\$(0,07763 + 0,22596) = R\$52.775.143,86/\text{ano} \quad (9)$$

Na Equação 10, obtém-se o valor monetário total da geração de energia.

Valor anual de ponta + Valor anual fora de ponta:

$$\mathbf{R\$10.837.995,67/ano + R\$52.775.143,86/ano = R\$63.613.139,53/ano} \quad (10)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com este trabalho, pode-se confirmar que atualmente há a viabilidade técnica com a utilização do biogás para fornecimento de energia. Foi constatado um caso de sucesso como a ETE Ribeirão Preto (SP), que firmou parceria com os fornecedores dos motogeradores, garantindo a manutenção permanente dos equipamentos, ao contrário do projeto ENERGBIO, realizado em 2002, na ETE Barueri (SP), no qual a falta de mão de obra especializada, a falta de peças de reposição e atendimento imediato, tornaram-se fatores impeditivos da viabilização do projeto, uma vez que os equipamentos eram importados.

Neste trabalho demonstrou-se a redução de custos operacionais em mais de R\$60 milhões com o uso do biogás para geração de energia elétrica nas estações de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo.

O uso do biogás para gerar energia, contribui positivamente na redução de impactos ambientais, como a redução dos gases de efeito estufa (GEE), pois o gás metano e o dióxido de carbono (CO₂), são os principais gases causadores desse efeito, e ainda há a possibilidade de gerar receitas com a vendas dos créditos de carbono. Como a geração de esgoto é algo permanente, a obtenção de metano sempre ocorrerá, desta forma sendo mais sustentável queimar o metano à um combustível fóssil.

Com a implantação de projeto para a geração de energia provinda do biogás, haverá um melhor gerenciamento do lodo, a fim de obter a maior produção de biogás, além de resultar em um lodo mais limpo, com menos matéria orgânica e menos patógenos. Quando transportado para aterros produzirá menos chorume, emitirá menos odor e em consequência resultará em um aterro menos nocivo ao meio ambiente.

5 CONCLUSÃO

Com o presente trabalho, conclui-se que é possível o aproveitamento energético no tratamento de esgoto, inclusive o de lodos ativados, mesmo sendo

este um processo aeróbio e com grande produção de lodo. O uso do biogás como fonte de geração de energia reduz os gastos operacionais da ETE, favorece o melhor gerenciamento do lodo, que contribui com a redução de volume de lodo transportado para os aterros e reduz as emissões de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, principais gases causadores do efeito estufa (GEE), além da possibilidade de obter receitas com a vendas dos créditos de carbono.

No processo de lodos ativados existe um grande gasto de energia elétrica, em torno de 40% dos custos operacionais de uma ETE, conforme dados fornecidos pela Ambient S.A. O aproveitamento do biogás poderia alimentar motogeradores, viabilizando a autossuficiência energética da Estação de Tratamento de Esgoto.

Para que o projeto de geração de energia provinda do biogás fosse implantado, alguns fatores viabilizaram a sua execução, sendo esses: redução dos gastos operacionais da Estação de Tratamento de Esgoto, economia com transporte de lodo para aterros, devido à redução do volume de lodo gerado, além das empresas fornecedoras dos motogeradores firmarem em contrato a manutenção da aparelhagem ao longo de um período de tempo que, ao final do contrato, pode ser reafirmado.

Caso essa tecnologia de geração de energia seja aplicada na Região Metropolitana de São Paulo, trará inúmeros benefícios, como a geração de aproximadamente 198.670.741kWh/ano provinda do biogás, que deixará de ser queimado em *flares* ou simplesmente levado para aterros, liberando gases nocivos ao meio ambiente. Também proporcionará uma economia de mais de R\$60 milhões aos cofres públicos pelo fato de produzir a própria energia elétrica, além de uma redução nos gastos com transporte do lodo para aterros.

A partir dos dados obtidos na ETE Ribeirão Preto, que tem em prática a tecnologia geradora de energia, e também através dos cálculos realizados para simulação da implantação na Região Metropolitana de São Paulo, é possível dizer que o biogás é um indutor para a expansão das redes de coleta e tratamento de esgoto no País. Pode-se então sugerir, como trabalhos futuros, estudos sobre os custos de implantação e operacionais na Região Metropolitana de São Paulo, além de estudos sobre uma melhor destinação para o lodo, este sendo aplicado como adubo, fertilizante ou até como adição em traços de concreto.

6 REFERÊNCIAS E CITAÇÕES

ABREU, Fábio Viana de. **Biogás**: economia, regulação e sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 184 p.

AES ELETROPAULO. **Tarifas de energia elétrica**: tarifas para o fornecimento de energia elétrica: Resolução nº 1.920 de 30/06/2015 da ANEEL: válidas a partir de 04/07/2015. 2016. Disponível em:
< <https://www.aeseletropaulo.com.br/poder-publico/prazos-e-tarifas/conteudo/tarifa-de-energia-eletrica> >. Acesso em: 23 abr. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) (Brasil). **Resolução Normativa N. 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília, 2015. 71 p. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 09 ago. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP Nº 23, de 13.8.2012 - DOU 14.8.2012 - Retificada DOU 15.8.2012 e DOU 15.4.2014**.

Disponível em:

<[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2012/agosto/ranp_23_2012.xml?fn=document-frameset.htm\\$f=templates\\$3.0](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2012/agosto/ranp_23_2012.xml?fn=document-frameset.htm$f=templates$3.0)>. Acesso em: 24 jan. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP Nº 8, de 30.1.2015 - DOU 2.2.2015**. Disponível em:
<[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2015/janeiro/ranp_8_2015.xml?f=templates\\$fn=document-frame.htm\\$3.0\\$q=\\$x=>](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2015/janeiro/ranp_8_2015.xml?f=templates$fn=document-frame.htm$3.0$q=$x=>)>. Acesso em: 24 jan. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**: Estudo de caso 2: CTR Santa Rosa – Estado do Rio de Janeiro. 2013. Disponível em:
<http://www.abrelpe.org.br/atlas/CTR_santa_rosa.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2016.

BETTIOL, Wagner; CAMARGO, Otávio Antonio de. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. **Ciência Hoje**, v. 42, p.25-35, 2008. Disponível em:
<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/BettiolCamargol_Disposicao_000fdq9th6v02wx5eo0a2ndxyh3hr620.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2016.

BLEY JUNIOR, Cícero. **Biogás a energia invisível**. 2. ed. São Paulo/Foz do Iguaçu: Planeta Sustentável, 2015. Disponível em:
<<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/03/livro-biogas-energia-invisivel-esta-disponivel-para-download/25698>>. Acesso em: 09 jul. 2015.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA DE BIOMASSA (CENBIO) - **Nota Técnica VII**: geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos urbano e rurais. São Paulo: USP/IEE, 2001. 11 p. Disponível em:
<http://143.107.4.241/download/documentos/Nota_Tecnica_VII_-_biogas.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2015.

COSTA, David Freire da. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**: 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, IEE/EPUSP/FEA/IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Cap. 2 e 3. Disponível em: <<http://www.prpg.usp.br/usprio/?q=trabalhos/geração-de-energia-elétrica-partir-do-biogás-do-tratamento-de-esgoto>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

FIGUEREDO, Natalie Jimenez Vérdi. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica**: estudo de caso. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/producao/2011/Teses/NatalieFigueiredo.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ), **Projeto Brasil Alemanha de fomento ao aproveitamento energético do biogás**: guia prático do biogás: geração e utilização. 5.ed. Gülzow, 2010. Disponível em: <http://web-resol.org/cartilhas/giz_-guia_pratico_do_biogas_final.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2015.

GIANSANTE, Antonio Eduardo. **Notas de Aula -estação de tratamento de esgotos**. São Paulo: Escola de Engenharia Mackenzie, 2015, 21p.

ICLEI - BRASIL - GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE (São Paulo) (Org.). **Manual para aproveitamento de biogás**. Volume 2 – Efluentes Urbanos. São Paulo, 2010. 77 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **População das Regiões Metropolitanas**: 2015. Disponível em: <<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:cpKRdTwsqioJ:www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/00000023091108112015113428941578.xls+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em: 27 abr. 2016.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de esgotos domésticos**. 5. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 941 p.

LOBATO, Livia Cristina da Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ENGD-8KYNF3/tese_n_57___l_via_lobato.pdf?sequence=1>. Acesso em: 16 jan. 2016.

ROSA, André Pereira. **Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto**. 2013. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUBD-9HKGWC>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

SILVA, Thaisa Carolina Ferreira. **Utilização de biogás de estações de tratamento de esgoto para fins energéticos**. 2015. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia e Ambiente, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

VALENTE, Victor Bustani. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso de biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil**. 2015. 164f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2. ed., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Desa/Universidade de Minas Gerais – UFMG, 1996. 243 p. v. 1.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: princípios básicos do tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Desa/Universidade de Minas Gerais – UFMG, 1996. 211 p. v. 2.

ZANETTE, André Luiz. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/zanette_luiz.pdf>. Acesso em: 11 out. 2015.