

## ESTUDO DAS EMISSÕES EVITADAS DE GEE E DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS GERADO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES, APLICADOS À CIDADE DE POUSO ALEGRE- MG<sup>1</sup>

DANIELLE RODRIGUES RAIMUNDO<sup>2</sup>, JULIANO ROMANZINI PEDREIRA<sup>2</sup>, LAYS  
CAMILA SOUSA<sup>2</sup>, MAXI ESTEFANY HUAMAN CÓRDOVA<sup>2</sup>, ROSANA TEIXEIRA  
MIRANDA<sup>2</sup>, SUSAN JOHANA BENITES CAÑOTE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aceito para Publicação no 4º Trimestre de 2017.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). [daniellerraimundo@yahoo.com.br](mailto:daniellerraimundo@yahoo.com.br),  
[juliano.pousoalegre@hotmail.com](mailto:juliano.pousoalegre@hotmail.com), [layscs@hotmail.com](mailto:layscs@hotmail.com), [maxiestefanyhc@gmail.com](mailto:maxiestefanyhc@gmail.com),  
[rosana\\_miranda@hotmail.com](mailto:rosana_miranda@hotmail.com), [sujobc@gmail.com](mailto:sujobc@gmail.com).

### RESUMO

O biogás, proveniente do tratamento de efluentes domésticos, constitui uma fonte de energia alternativa e renovável com potencial para aproveitamentos energéticos e diminuição de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Na obtenção do biogás são empregados os biodigestores, entre eles o digestor UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), que vem sendo mais largamente utilizado. O presente estudo propõe dimensionar dois tipos de biodigestores, aplicados à cidade de Pouso Alegre-MG e avaliar seus potenciais de obtenção de biogás, além da viabilidade econômica, aproveitamento de energia e emissões de GEE evitadas. O estudo concluiu que, dentre as tecnologias avaliadas, o digestor tipo UASB é o mais eficiente, e apesar da inviabilidade econômica de sua implantação, no cenário adotado, sua aplicação consegue abater até 95% da energia consumida pela estação de tratamento de

esgoto da cidade de Pouso Alegre-MG, além de evitar a emissão de 21.562,82 ton CO<sub>2</sub> eq/ano, contribuindo favoravelmente para o meio ambiente e para o uso de energias limpas.

**Palavras-chave:** aproveitamento energético, biogás, emissões evitadas.

## ABSTRACT

Biogas, originated from the treatment of domestic effluents, consists in an alternative and renewable energy source with potential for energy uses and the reduction of greenhouse gases (GHG) emissions. In the biogas production, biodigestors are employed, among them UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) digester, which has been more widely used. The present study proposes to size two types of biodigesters, applied to the city of Pouso Alegre-MG, and evaluating its potential for obtaining biogas, besides the economic viability, energy uses and GHG emissions avoided. It was concluded that, among the technologies evaluated, the UASB type digester is the most efficient, and despite of its non-economic viability of its implementation, in the scenario adopted, its application can reduce up to 95% of the energy consumed by the Pouso Alegre's sewage treatment plant, besides avoiding an emission of 21,562.82 tons CO<sub>2</sub> eq/year, contributing favorably to the environment and the use of clean energy.

**Keywords:** biogas, energy recovery, emissions avoided.

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de esgoto se relaciona diretamente com o aumento da população urbana e do espaço por ela ocupado, apresentando-se assim em vertiginoso crescimento. O panorama brasileiro de tratamento de resíduos sólidos e de efluentes domésticos traduz-se em tímida evolução que, contudo, negligencia o aproveitamento do biogás, subproduto desse processo.

Com apenas 42,67% dos esgotos tratados, a estrutura de saneamento no Brasil demonstra grande ineficiência em diminuir o potencial poluidor desses rejeitos, que na maior parte dos casos são retornados aos cursos de água sem nenhuma modificação (SNIS, 2015).

Apesar da deficiência no tratamento, o Brasil possui uma média de produção diária de efluentes igual a 0,15 m<sup>3</sup> por habitante (CHERNICHARO, 2007), o que representa grande capacidade projetada no aproveitamento do biogás liberado nessa atividade.

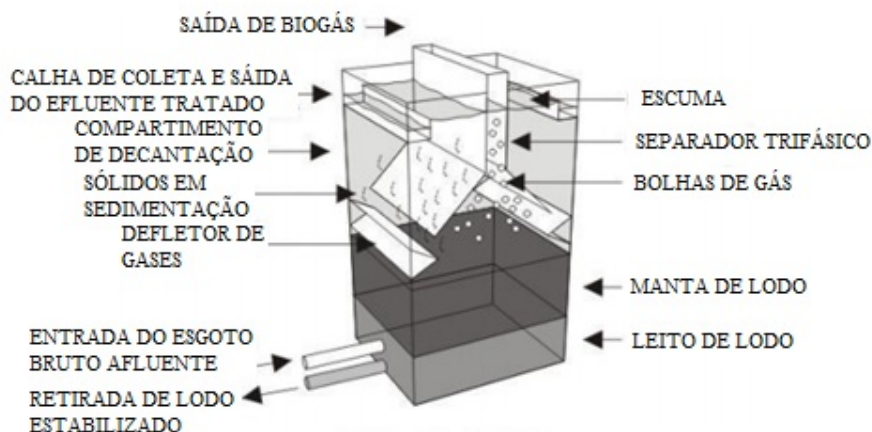
O biogás é uma mistura gasosa, combustível e produto do processo de fermentação da matéria orgânica na ausência de oxigênio em biodigestores. Em sua composição, estão presentes diversos gases como o metano (CH<sub>4</sub>) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sendo que a

quantidade de cada gás na mistura varia conforme o biodigestor utilizado e o substrato digerido. O potencial energético do biogás deriva da quantidade e do poder calorífico do metano (CENBIO, 2000). Assim, o aproveitamento energético do biogás, além de contribuir para diminuição da emissão de gases de efeito estufa e para a redução de impactos ambientais, tem grande relevância como alternativa para suprir o consumo de energia da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

A geração de biogás a partir de efluentes domésticos está diretamente relacionada a dois fatores. O primeiro é a quantidade de matéria orgânica presente nesses efluentes, a qual varia de acordo com a população atendida pelos serviços de coleta e com a produção de material biodegradável por pessoa. O segundo fator está associado às características do tratamento, podendo este ser realizado através de processo anaeróbio ou aeróbio.

Os biodigestores são equipamentos relativamente simples, onde se processam as reações necessárias à fermentação anaeróbia da matéria orgânica que irá produzir o biogás e ainda, o biofertilizante, que é um subproduto desse processo. Podem ser de vários modelos, como o indiano ou o canadense. Cada qual com características próprias de operação, com vantagens e desvantagens. Nesse contexto, destaca-se o UASB (Figura 1), que é um digestor anaeróbio de fluxo ascendente utilizado no tratamento do esgoto doméstico e que tem sido mais utilizado que outros tipos de digestores. O tratamento nesse equipamento se dá pela entrada do esgoto no fundo do reator que, em seu movimento ascendente, atravessa uma camada de lodo biológico que se encontra em sua parte inferior, passando por um separador de fases enquanto escoar em direção à superfície. Hoje, este tipo de reator encontra-se bastante difundido e tem sido aplicado para tratamento de muitos tipos de águas residuárias, sendo o aspecto essencial do processo a natureza da biomassa ativa (QUARMBY e FORSTER, 1995).

Figura 1 - Representação esquemática de um UASB.



Fonte: Adaptado de Jordão e Volschan Jr. (2009)

O objetivo geral deste estudo é dimensionar um sistema para produção de biogás através do efluente de uma ETE localizada à cidade de Pouso Alegre - MG. Será realizada a projeção populacional para a cidade em questão, o dimensionamento de um biodigestor convencional e de um biodigestor tipo UASB. Após, serão comparadas as duas tecnologias, verificando qual delas é mais eficiente para o aproveitamento energético do biogás e serão calculados os abatimentos de gases de efeito estufa, a viabilidade econômica e o aproveitamento energético do biogás, como forma de suprir o consumo de energia da própria estação de tratamento.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

O estudo teve como área o município de Pouso Alegre, situado no sul do estado de Minas Gerais, nas coordenadas 22°14'36''S e 45°55'48''O, de acordo com o software Google Earth (2015). O município apresenta área territorial de 543,068 km<sup>2</sup> e população de aproximadamente 130.615 habitantes, conforme IBGE (2010).

#### 3.2. Projeção populacional no município de Pouso Alegre – MG

A projeção foi realizada tendo como base o modelo de crescimento logístico, indicado em Barros (2013), onde são apresentadas as equações (1), (2), (3) e (4) expressadas por Qasim (1985 apud VON SPERLING, 2005).

$$K_s = \frac{2P_0 P_1 P_2 - P_1^2(P_0 + P_2)}{(P_0 P_2 - P_1^2)} \quad (1)$$

$$a_1 = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left[ \frac{P_0 (K_s - P_1)}{P_1 (K_s - P_0)} \right] \quad (2)$$

$$c = \frac{(K_s - P_0)}{P_0} \quad (3)$$

$$P_t = \frac{K_s}{1 + c - e^{a_1 (t - t_0)}} \quad (4)$$

Onde:

$K_s$ : Corresponde à capacidade de saturação da população;

$P_0$ : Corresponde ao ano de 1991;

$P_1$ : Corresponde ao ano de 2000;

$P_2$ : Corresponde ao ano de 2010;

$a_1$ ,  $c$ : Coeficientes que controlam a forma e descrevem a localização da curva, respectivamente;

$t_1$ : Corresponde ao ano 2000;

$t_2$ : Corresponde ao ano 2010;

$P_t$ : refere-se à população estimada para os próximos 20 anos, ou seja, “t” corresponde a cada um dos anos em relação ao período de projeção adotado, no caso de 2016 a 2036.

### 3.3. Dimensionamento biodigestor convencional

O dimensionamento do biodigestor convencional foi realizado baseado na metodologia de Jordão e Pessoa (2005).

Para o cálculo de Sólidos Suspensos (SS) Afluentes (lodo adensado) foi considerado 4% de sólidos totais em 80 g ST/ hab. dia de lodo ativado convencional (LA), lodo misto bruto e adensado (CASSINI, 2003). Os valores para Sólidos Voláteis/Sólidos Totais (SV/ST), teor de sólidos no lodo afluente e teor de sólidos no lodo digerido foram utilizados de acordo com o autor e estão indicados na tabela (1).

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no dimensionamento

Dados	%
SV/ST	75
Teor de sólidos no lodo efluente	5

Fonte: Jordão e Pessoa, 2005.

Com o SS Afluente foi possível calcular o valor da vazão afluente através da equação (5).

$$Q_{\text{afluente}} = \frac{M}{10TS} \quad (5)$$

Onde:

$Q_{\text{afluente}}$  = vazão afluente, em m<sup>3</sup>/dia;

M = valor de SS Afluente;

TS = teor de sólidos.

Os Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) é o produto entre SS Afluente e SV/ST. Posteriormente, foi calculado os Sólidos Suspensos Fixos (SSF), onde seu valor é a subtração de SS Afluente e SSV.

A taxa de aplicação foi adotada pelo mesmo autor, sendo esta igual a 2 kg SSV/m<sup>3</sup>.dia.

Subsequentemente foi estimado o volume útil do biodigestor (Equação 6).

$$V = \frac{SSV_{\text{afluente}}}{\text{Taxa de aplicação}} \quad (6)$$

Onde:

V = volume útil do biodigestor, em m<sup>3</sup>;

Através do volume do digestor, estimou-se o tempo de detenção (*t*) esperado (Equação 7).

$$t = \frac{V}{Q_{\text{afluente}}} \quad (7)$$

Onde:

$V$  = volume do biodigestor, em  $m^3$ ;

$Q_{\text{afluente}}$  = vazão afluyente, em  $m^3/\text{dia}$ ;

Por fim, foram calculadas as reduções esperadas para SSV e SST no lodo digerido (Equações 8 e 9).

$$SSV = SV/ST * SSV_{\text{afluente}} \quad (8)$$

$$SST = SSV + SSF \quad (9)$$

Onde:

SSV = sólidos suspensos voláteis;

SST = sólidos suspensos totais;

SSF = sólidos suspensos fixos.

Após o dimensionamento do biodigestor, foi realizado o cálculo da produção de biogás, em  $m^3/\text{dia}$ . Para tal, foi utilizado o número de habitantes do ano 20 da projeção populacional e o índice de geração diária de biogás por habitante igual a  $30L/\text{hab.dia}$ , sugerida por Jordão e Pessoa (2005) (Equação 10). O ano 20 da projeção é utilizado por considerar que a partir deste ano, a população de uma cidade tende a saturação (VON SPERLING, 2005).

$$\text{Produção de Biogás} = \text{População total} * \text{índice de geração diária} \quad (10)$$

Onde:

População<sub>total</sub> = população total do estudo no ano 20, em habitantes.

Em seguida, foi estimada a potência útil final em kW (Equação 11). O poder calorífico do gás (PCI) é estimado entre  $22.500 - 25.000 \text{ KJ}/m^3$ , logo foi adotado o valor de

24.000 KJ/m<sup>3</sup> (BARROS *et al.*, 2013). O aproveitamento percentual de CH<sub>4</sub> no biogás foi estimado em 75% (LOBATO, 2011). Para este trabalho, foi admitida uma eficiência da máquina térmica igual a 30% (CENBIO, 2004) e um rendimento do gerador igual a 87% (PEREIRA, ca. 2000).

$$\text{Potência útil final} = \text{PCI} * \text{Produção de Biogás} * 0,75 * \eta_{\text{tec}} * \eta_{\text{gerador}} \quad (11)$$

Onde:

PCI = poder calorífico, em kJ/m<sup>3</sup>;

$\eta_{\text{tec}}$  = eficiência da máquina térmica;

$\eta_{\text{gerador}}$  = eficiência do gerador.

Para o cálculo da energia em MWh/ano, foi utilizada a equação (12), considerou-se um tempo de operação do motor igual a 24h/dia, com um fator de capacidade de 0,60 (SANTOS *et al.*, 2001).

$$\text{Energia} = P * T_m * FC \quad (12)$$

Onde:

P = potência útil, em kW;

T<sub>m</sub> = tempo de operação do motor, em horas/dia;

FC = fator de capacidade.

### 3.4. Dimensionamento Reator UASB

O dimensionamento do reator UASB foi realizado seguindo a mesma metodologia do dimensionamento do biodigestor convencional (JORDÃO e PESSOA, 2005).

Para encontrar o valor do SS Afluente (lodo adensado), multiplicou-se o número de habitantes do ano 20 da projeção populacional pelo volume do lodo. Segundo Von Sperling (2003), o volume de lodo a ser tratado em reatores UASB está entre 0,5 - 1,0 L lodo/hab.dia. Para o cálculo, utilizou-se o valor médio, ou seja, 0,75 L lodo/hab.dia. A densidade do lodo foi tomada igual a 1 kg/m<sup>3</sup> (VON SPERLING, 2005).

Para o cálculo do SSV, o valor adotado para o SV/ST foi de 0,20, segundo Campos (1994, *apud* MENDONÇA, 2002).

A produção de biogás foi estimada, sabendo-se que o valor de SSV para o reator UASB fica entre 0,2 – 0,7 L gás/ g de SSV, sendo adotado o valor de 0,5 SSV.

Considerou-se uma retenção de 25% do biogás, encontrando assim o valor real do biogás produzido.

Posteriormente foram calculadas a potência útil e a energia final ~~e a energia final útil~~, da mesma forma do dimensionamento anterior, para um período de um ano.

### 3.5. Estimativa da quantidade dos gases $CH_4$ e $CO_2$ presentes no biogás

Com a estimativa da produção de biogás, considerando a alternativa mais eficiente, será calculada a produção de gás metano e dióxido de carbono presentes no biogás. De acordo com a NBR 12.209/2011, o percentual destes gases no biogás é de aproximadamente 65% de metano e 27% de dióxido de carbono. Com base nesses percentuais de concentrações, foi estimada a produção do  $CH_4$  e  $CO_2$ , em kg/ano, através das equações (13) e (14), respectivamente. Esses cálculos foram realizados com base no balanço de massa, e foi considerado para os mesmos que o volume do gás é de 0,02271 m<sup>3</sup>/mol nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP) e que os valores de massa molar do metano é de 0,016 kg/mol e a do dióxido de carbono é de 0,044 kg/mol.

$$CH_{4\text{volume}} = \frac{(P_{\text{total}} * 65\% * 365 \text{ dias} * MMCH_4)}{\text{Vol gás}} \quad (13)$$

$$CO_{2\text{volume}} = \frac{(P_{\text{total}} * 27\% * 365 \text{ dias} * MMCO_2)}{\text{Vol gás}} \quad (14)$$

Onde:

$CH_{4\text{volume}}$  = produção do gás metano, em kg/ano;

$CO_{2\text{volume}}$  = produção do gás dióxido de carbono, em kg/ano;

$P_{\text{total}}$  = produção total de biogás, em m<sup>3</sup>/dia;

$MMCH_4$  = massa molar do metano, em kg/mol;

$MMCO_2$  = massa molar do dióxido de carbono, em kg/mol;

$\text{Vol gás}$  = volume do gás nas condições CNTP, em m<sup>3</sup>/mol.

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

Segundo a EPA (*Environmental Protection Agency*, 2010), sistemas de tratamento anaeróbios produzem tanto CO<sub>2</sub> quanto CH<sub>4</sub>. Seguindo a metodologia estabelecida pela EPA, foram calculadas as emissões de GEE desses gases para os volumes resultantes de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> no biogás, utilizando as equações (15) e (16).

$$\text{CO}_2 = 10^{-6} * Q_{ww} * OD * \text{EffOD} * \text{CF}_{\text{CO}_2} * [\lambda (1 - \text{MCFs} * \text{BGCH}_4)] \quad (15)$$

$$\text{CH}_4 = 10^{-6} * Q_{ww} * OD * \text{EffOD} * \text{CF}_{\text{CH}_4} * [\lambda (\text{MCFs} * \text{BGCH}_4)] \quad (16)$$

Onde:

CO<sub>2</sub> = taxa de emissão de CO<sub>2</sub>, em mg/h;

CH<sub>4</sub> = taxa de emissão de CH<sub>4</sub>, em mg/h;

10<sup>-6</sup> = unidades de fator de conversão, em mg/g;

Q<sub>ww</sub> = vazão de esgoto afluyente, em m<sup>3</sup>/h;

OD = demanda de oxigênio dos esgotos afluentes à unidade de tratamento biológico, ou seja, concentração de DBO no lodo do esgoto, em mg/L ou g/m<sup>3</sup>;

EffOD = eficiência de remoção de DBO na unidade de tratamento biológico;

CF<sub>CO<sub>2</sub></sub> = fator de conversão para a geração máxima de CO<sub>2</sub> por demanda de oxigênio (44/32 = 1,375g CO<sub>2</sub>/g demanda de oxigênio);

CF<sub>CH<sub>4</sub></sub> = fator de conversão para a geração máxima de CH<sub>4</sub> por demanda de oxigênio (16/32 = 0,5 g CH<sub>4</sub> /g demanda de oxigênio);

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

BGCH<sub>4</sub> = fração de carbono na forma de CH<sub>4</sub> no biogás gerado;

λ = rendimento de biomassa (g de carbono convertido em biomassa/ g de carbono consumido no efluente no processo de tratamento).

Na digestão anaeróbia do lodo, os parâmetros utilizados de BGCH<sub>4</sub> e MCFs são de 0,65 e 0,80 respectivamente, conforme recomendado pela EPA (2010). Ainda seguindo a recomendação da EPA (2010), para a concentração de DBO (OD) foi adotado o valor de

500mg/L, para eficiência de remoção de DBO no tratamento (EffOD) foi utilizado o valor de 95% e para rendimento de biomassa ( $\lambda$ ) foi utilizado o valor padrão igual a 0,65.

### 3.7. Determinação do $CO_{2equivalente}$ segundo metodologia estabelecida pelo EPA

Para determinar os impactos das emissões de GEE de diferentes tipos de gases, é preciso utilizar uma métrica comum para somá-los e compará-los. Conforme EPA (2010), a métrica usual é a do potencial de aquecimento global (Global Warming Potential – GWP). O GWP mede quanto da emissão de uma tonelada de um determinado gás será absorvido em um período de tempo, relativo à emissão de uma tonelada de  $CO_2$  ( $CO_{2equivalente}$ ). Geralmente, o período de tempo usado é de 100 anos. Desta forma, quanto maior o GWP, maior a sua contribuição para aquecimento da Terra. A tabela (2) apresenta os valores para os gases  $CO_2$  e  $CH_4$  que compõem em maior parte o biogás proveniente de processos anaeróbios. Por definição, o  $CO_2$  possui GWP de 1 por ser o gás de referência.

Tabela 2 – Valor correspondente para o GWP dos gases  $CO_2$  e  $CH_4$

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

Fonte: EPA (2010).

O cálculo para estimar o dióxido de carbono equivalente, conforme EPA (2010), é o demonstrado na equação (17).

$$CO_{2eq} = \sum_{i=1}^n GHG_i \times GWP_i \quad (17)$$

Onde:

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

$GHG_i$  = emissões por cada GEE, em toneladas por ano;

$GWP_i$  = GWP do respectivo GEE (Tabela 4);

n = número de GEE emitidos a partir da fonte.

### 3.8. Análise da viabilidade econômica

Para avaliar o potencial econômico de utilização do biogás, como recurso energético, serão considerados dois aspectos:

- a) Custo operacional e receita equivalente da energia produzida, a partir da produção de biogás;
- b) Uso da energia produzida, a partir da produção de biogás, para atendimento da própria ETE.

Para estimar os valores de implantação, operação e manutenção (O&M) e de consumo energético da ETE, foram considerados, conforme Von Sperling (2005), os valores per capita dos principais sistemas de tratamentos de esgotos, tomando os valores mais baixos de implantação e O&M, com suas correções aos valores atuais, utilizando a cotação média do dólar americano de 2005 e de 2016. Conforme BACEN (2017), os valores médios do dólar em 2005 e 2016 é de R\$ 2,43 e R\$ 3,48 respectivamente. Para o consumo energético da ETE, adotou-se os valores médios em kWh/hab.ano para sistema convencional e para sistema UASB. Os valores propostos por Von Sperling (2005) estão na tabela (3) e os valores utilizados se encontram na tabela (4).

Tabela 3 – Valores per capita dos sistemas de tratamento de esgoto.

Sistema	Implantação R\$/hab	O&M R\$/hab. Ano	Consumo Energético kWh/hab.ano
Convencional	80 - 150	10 - 18	18 -26
UASB+ lodo ativado	70 - 110	7 - 12	14 - 20

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005).

Tabela 4 – Valores per capita utilizados.

Sistema	Implantação R\$/hab	O&M R\$/hab. Ano	Consumo Energético kWh/hab.ano
Convencional	114,57	14,32	22
UASB+ lodo ativado	100,25	10,02	17

Nota: valores em reais atualizados pelo dólar.

Os cálculos dos valores totais de investimento, O&M e consumo energético, a partir da tabela (4), serão conforme as equações (18), (19) e (20) respectivamente.

$$\text{Investimento}_{\text{total}} = \text{Valor}_{\text{impl.}} * \text{População}_{\text{total}} \quad (18)$$

Onde:

$\text{Investimento}_{\text{total}}$  = valor total do investimento, em R\$;

$\text{Valor}_{\text{impl}}$  = valor de implantação per capita a partir da tabela (4), em R\$/ hab.ano;

$\text{População}_{\text{total}}$  = população total do estudo no ano 20, em habitantes.

$$\text{Custo}_{\text{O\&M}} = \text{Valor}_{\text{O\&M}} * P_{\text{total}} \quad (19)$$

Onde:

$\text{Custo}_{\text{O\&M}}$  = total do custo de O&M anual da ETE, em R\$/ano;

$\text{Valor}_{\text{O\&M}}$  = valor per capita de O&M a partir da tabela (4), em R\$/ hab.ano;

$\text{População}_{\text{total}}$  = população total do estudo no ano 20, em habitantes.

$$\text{Consumo}_{\text{energ.}} = \text{Consumo}_{\text{hab}} * P_{\text{total}} * 10^{-3} \quad (20)$$

Onde:

$\text{Consumo}_{\text{energ.}}$  = consumo energético anual da ETE, em MWh/ ano;

$\text{Consumo}_{\text{hab}}$  = consumo energético per capita a partir da tabela (4), em kWh/hab.ano;

$\text{População}_{\text{total}}$  = população total do estudo no ano 20, em habitantes;

$10^{-3}$  = Transformação de kWh para MWh.

Para o cálculo da receita anual equivalente neste estudo, não será considerada a venda da energia produzida, mas sim que toda energia gerada será utilizada para consumo da própria ETE e poderá ser compensada pelo valor anual cobrado pela concessionária, ou seja, a receita será produzida a partir da economia que a ETE obterá de seus custos anuais de energia. Foi adotada a tarifa industrial da CEMIG igual a R\$ 410,27 o MWh, conforme a ABRADDEE (2016). A receita anual será dada pela equação (21).

$$\text{Receita}_{\text{anual}} = \text{Energia}_{\text{prod.}} * \text{tarifa} \quad (21)$$

Onde:

Receita<sub>anual</sub> = total da receita anual da ETE, em R\$/ano;

Energia<sub>prod.</sub> = energia produzida (tabela 7), em MWh/ano;

Tarifa = tarifa de energia, em R\$/MWh.

O fluxo de caixa para a análise da viabilidade econômica da ETE consiste na diferença da quantidade líquida total entre despesas calculadas pelas equações (18), (19) e (20) e receita pela equação (21).

A viabilidade será realizada a partir do valor presente líquido (VPL) onde, a partir do fluxo de caixa, será determinado o valor presente dos pagamentos futuros, descontados a uma taxa de juros de 12%, subtraindo-se o custo do investimento inicial. Esta taxa foi considerada como uma taxa mínima de atratividade e representa o mínimo para que o investimento seja viável.

$$\text{VPL} = \frac{\text{FC}_0 + \text{FC}_1/(1+j)^1 + \dots + \text{FC}_t}{(1+j)^t} \quad (22)$$

Onde:

FC = fluxo de caixa do enésimo ano, em R\$;

j = taxa de desconto (%);

t = vida útil do projeto, em anos.

Para simplificação desta análise econômica, não foi considerado o reajuste da tarifa de energia ao longo dos anos, assim como a produção de energia da ETE para o cálculo da receita e os custos de O&M, que foram calculados com a população do ano 20 e não como uma função do aumento da população ao longo dos anos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. *Projeção populacional*

Após a aplicação do modelo de crescimento logístico para obtenção da projeção populacional da cidade de Pouso Alegre, chegou-se aos resultados apresentados na tabela (5). Para o ano 20 da projeção, a quantidade de habitantes estimada é igual a 173.106 habitantes.

Esse valor será utilizado nos cálculos dos dimensionamentos e nas análises que serão apresentadas na tabela (6).

Tabela 5 – Resultados da projeção populacional da cidade de Pouso Alegre

<b>Ano</b>	<b>População<sup>1</sup></b>	<b>Ano</b>	<b>População<sup>1</sup></b>
<b>2017</b>	143.261	<b>2028</b>	162.037
<b>2018</b>	145.212	<b>2029</b>	163.450
<b>2019</b>	147.115	<b>2030</b>	164.816
<b>2020</b>	148.970	<b>2031</b>	166.134
<b>2021</b>	150.776	<b>2032</b>	167.407
<b>2022</b>	152.533	<b>2033</b>	168.634
<b>2023</b>	154.240	<b>2034</b>	169.816
<b>2024</b>	155.898	<b>2035</b>	170.955
<b>2025</b>	157.507	<b>2036</b>	172.051
<b>2026</b>	159.066	<b>2037</b>	173.106
<b>2027</b>	160.576		

Notas <sup>1</sup> - Utilizando o crescimento logístico, o qual teve valores mais próximos da realidade.

#### 4.2. Resultados dos dimensionamentos para biodigestor convencional e UASB

Os resultados obtidos nos dimensionamentos do biodigestor convencional e biodigestor UASB estão apresentados na tabela (6). Pode-se perceber que os parâmetros calculados para o biodigestor UASB apresentam, em geral, resultados melhores que o biodigestor convencional, principalmente no que diz respeito à produção de biogás, potência gerada e energia. Entretanto, como desvantagens, o biodigestor UASB necessita de maiores espaços, pois apresenta um volume útil de 64.914,75 m<sup>3</sup>, muito mais elevado que o volume útil requerido para o biodigestor convencional. Além disso, o tempo de detenção do biodigestor UASB também é maior, 25 dias, outra desvantagem desse tipo de reator.

Tabela 6 – Resultados para o biodigestor convencional e biodigestor UASB

Biodigestor Convencional		Biodigestor UASB	
Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
SS Afluente	13.294,54 kg/dia	SS Afluente	129.829,5 kg/m <sup>3</sup>
SV/ST	75%	SV/ST	20%
Vazão Afluente	265,89 m <sup>3</sup> /dia	Vazão Afluente	2.596,6 m <sup>3</sup> /dia
SSV Afluente	9.970,91 kg SV/dia	SSV Afluente	25.965,9 kg SV/m <sup>3</sup> .dia
SSF Afluente	3.323,63 kg SF/dia	SSF Afluente	103.863,6 kg SSF/dia

(continuação)

Biodigestor Convencional		Biodigestor UASB	
Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
Taxa de aplicação	2 kg SSV/m <sup>3</sup> .dia	Taxa de aplicação	2 kg SSV/m <sup>3</sup> .dia
Volume útil	4.985,46 m <sup>3</sup>	Volume útil	64.914,75 m <sup>3</sup>
Tempo de detenção	19 dias	Tempo de detenção	25 dias
Redução de SSV	7.478,18 kg de SSV/dia	Redução de SSV	19.474,43 Kg de SSV/dia
Redução de SST	10.801,81 kg de SST/dia	Redução de SST	123.338,03 kg de SST/dia
Produção de biogás	5.193,18 m <sup>3</sup> /dia	Produção de biogás	9.737,21 m <sup>3</sup> /dia
Potência útil final	282,38 kW	Potência	529,46 kW
Energia	1.484,18 MWh/ano	Energia	2.782,85 MWh/ano
Energia	130.316,06 kW/ano	Energia útil final	325.790,82 kW/ano

A tabela (7) resume os resultados obtidos para cada dimensionamento, em relação à energia útil final produzida em 1 (um) ano.

Tabela 7 – Valores de energia produzida a partir do biogás nos tratamentos analisados

Sistema	Energia produzida MWh/ano
Convencional	1.484,18
UASB + lodo ativado	2.782,85

#### 4.4. Quantitativos estimados da geração de gases CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> e emissões de CO<sub>2</sub> equivalente

Dessa forma, pode-se perceber que a tecnologia do reator UASB é mais eficiente, em relação à produção de energia a partir do biogás, produzindo 187% a mais de energia do que o biodigestor convencional.

#### 4.4. Quantitativos estimados da geração de gases $CH_4$ e $CO_2$ e emissões de $CO_2$ equivalente

A partir dos resultados encontrados para a geração de biogás, foi possível estimar a produção de  $CH_4$  e de  $CO_2$ . A tabela (8) apresenta as estimativas da geração anual em kg/ano de  $CH_4$  e de  $CO_2$ .

Tabela 8 - Valores estimados da geração anual de  $CH_4$  e de  $CO_2$  a partir do biogás produzido

Produção de Biogás $m^3/dia$	Produção de $CH_4$ Kg/ano	Produção de $CO_2$ Kg/ano
9.737,21	1.627.584,73	1.859.202,55

Foram estimadas as emissões de  $CH_4$  e  $CO_2$  seguindo a metodologia estabelecida pelo EPA (2010). Os resultados encontrados de emissões de  $CO_2$  e  $CH_4$  estão reunidos na tabela (9).

Tabela 9 - Valores estimados da geração anual de  $CH_4$  e de  $CO_2$  a partir do biogás produzido pela ETE.

Emissões de $CO_2$ kg/ano	Emissões de $CO_2$ ton/ano	Emissões de $CH_4$ kg/ano	Emissões de $CH_4$ ton/ano
2.325.402,25	2.325,40	916.067,55	916,07

Seguindo a metodologia estabelecida pelo EPA, foram multiplicados os valores de GWP correspondentes, cujos resultados estão apresentados na tabela (10).

Tabela 10 - Valores estimados e convertidos a unidade comum de CO<sub>2</sub> equivalente.

<b>Emissões de CO<sub>2</sub> eq para CO<sub>2</sub></b> <b>ton CO<sub>2</sub> eq/ano</b>	<b>Emissões de CO<sub>2</sub> eq para CH<sub>4</sub></b> <b>ton CO<sub>2</sub> eq/ano</b>	<b>Emissão Total ETE</b> <b>ton CO<sub>2</sub> eq/ano</b>
2.325,40	19.237,42	21.562,82

Dados de CO<sub>2</sub> equivalente de 2014 do relatório do MCTI (2016) mostram que as emissões de GEE do tratamento de resíduos orgânicos, onde fazem parte as ETEs, contribuem com cerca de 5% das emissões brasileiras. Comparada às emissões de outros setores no Brasil, as emissões da ETE não representa uma quantidade expressiva. Dados da tabela (11) mostram um comparativo das emissões por setores. Apesar do valor de emissão de GEE no tratamento de resíduos não ser muito significativo, se considerarmos os dados do MCTI de 2016, as contribuições de CO<sub>2</sub> equivalente aumentaram, em 2014, em 16% quando comparadas as do ano de 2010.

Admitindo-se que esse incremento da emissão dos GEEs produzida pelo tratamento de resíduos sólidos, foi devido ao aumento da população brasileira, pode-se concluir que sua participação tenderá a aumentar.

Tabela 11 - Emissões em CO<sub>2</sub> equivalente por setor no ano de 2014.

<b>Setor</b>	<b>Gg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>%</b>
<b>Energia</b>	469.832	37%
<b>Processos industriais</b>	94.263	7%
<b>Agropecuária</b>	424.473	33%
<b>Mudança de uso da terra e florestas</b>	233.140	18%
<b>Tratamento de resíduos</b>	62.787	5%
<b>Total emissões</b>	<b>1.284.495</b>	<b>100%</b>

Fonte: Adaptado de MCTI (2016). Gg = milhares de toneladas

Na situação avaliada, deixariam de serem lançados 21.562,82 ton CO<sub>2</sub> eq/ano para a atmosfera, o que demonstra que o aproveitamento do biogás pode ser considerado como um grande benefício ambiental para a questão do aquecimento global.

#### 4.7. Viabilidade econômica

A partir dos dados econômicos obtidos nesse trabalho, foi possível realizar os cálculos de viabilidade econômica da ETE a partir do cálculo do VPL. Os dados apresentados na tabela (12), sobre os custos de implantação, operação e manutenção e a

receita final, indicam que há inviabilidade econômica do aproveitamento do biogás para a geração de energia, considerando que as receitas obtidas não pagariam os custos anuais de implantação e de O&M. Ainda na tabela (12), o percentual obtido é referente à receita em relação ao custo total.

Tabela 12 – Resultados obtidos na análise de viabilidade econômica

Sistema	Implantação (R\$)	Custo O&M (R\$/ano)	Receita (R\$/ano)	VPL
Convencional	19.832.754,42	2.478.877,92	608.914,53	-21.781.810,14
UASB + lodo ativado	17.353.876,50	1.734.522,12	1.141.715,77	-42.896.846,04

Analisando, porém, o uso da energia produzida para suprimento do consumo interno, e a energia produzida considerando o reator UASB, cuja capacidade geradora é maior do que do biodigestor convencional, este tipo de instalação chegaria a atender o consumo energético da ETE em quase sua totalidade, como mostra a tabela (13).

Tabela 13 – Porcentagem da energia que abateria o consumo da ETE

Sistema	Energia produzida MWh/ano	Consumo Energético MWh/ano	%
Convencional	1.484,18	3.808,33	39%
UASB + lodo ativado	2.782,84	2.942,80	95%

Logo, pode-se perceber que o aproveitamento do biogás em estações de tratamento de efluentes possui vantagens energéticas e ambientais, contribuindo para a não emissão de gases poluentes de efeito estufa na atmosfera e para a economia do consumo energético de uma ETE, representando uma redução considerável da conta de energia.

## 5. CONCLUSÃO

O tratamento de esgoto para fins energéticos é um aproveitamento que deve ser mais explorado no Brasil, já que o país apresenta condições climáticas e geográficas favoráveis a esse potencial. As tecnologias de aproveitamento do biogás não só contribuem para o tratamento do efluente, como também auxiliam na diminuição da emissão de gases de efeito estufa, além de outros benefícios ambientais, como a não utilização de aterros sanitários. No

estudo apresentado neste artigo, o biodigestor tipo UASB foi o que apresentou resultados mais satisfatórios, produzindo uma energia útil final que atenderia até 95% do consumo energético da ETE a qual estiver inserido. Apesar da inviabilidade econômica, verificada pelo cálculo da VPL negativo, o biodigestor tipo UASB contribuiu, ainda, para a diminuição da emissão de gás metano e dióxido de carbono, deixando de emitir até 21.562,82 ton CO<sub>2</sub> eq/ano. Sugerem-se melhorias de eficiência do processo e também custos mais acessíveis para a implantação e operação desses reatores, para que além das vantagens ambientais, seu uso seja economicamente viável.

## 5. AGRADECIMENTOS

A Professora Doutora Regina Mambeli Barros pelo apoio durante a elaboração deste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRADEE. Associação brasileira dos distribuidores de energia elétrica. **Tarifas médias de fornecimento por distribuidora-classe comercial**. 2016. Disponível em <energia <http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>>.

Acesso em Maio de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.209**. Rio de Janeiro, 2011.

BARROS, R. M. 2013. **Tratado sobre resíduos sólidos: Gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro, Interciência, 374p.

BARROS, Regina Mambeli; FILHO, Geraldo Lucio Tiago; Santos, Ivan Felipe Silva. **Electricity generation from biogás of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential**. Elsevier. Journal of Cleaner Production, Volume 126, p. 504-514, Julho de 2015.

BRASIL. Banco central-BACEN. **Cotação dólar mensal**. Disponível em <<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpeq.asp?id=txcotacao>>. Acesso em Maio de 2017.

MENDONÇA, L. C. (2002). **Microbiologia e cinética de sistema de lodos ativados como pós-tratamento de reator anaeróbico de leito expandido**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 219 p, São Carlos-SP, 1994.

CASSINI, S. T. (coord.). **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. 210 p.: Il. Projeto PROSAB.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Medidas mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica**. Dupligráfica Editora. 22p. Brasília, 2000.

CENBIO. Centro nacional de referência em biomassa. **Projeto instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto (ENERG-BIOG)**. Relatório Técnico final. São Paulo: ENER, 2004. 222 p.

CHERNICHARO, C.A.L., 2007. Anaerobic Reactors (Reatores Anaeróbios). Department of Sanitary and Environmental Engineering – Universidade Federal de Minas Gerais (Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental).

CHERNICHARO, C.A.L. (coordenador). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte. Projeto PROSAB 2 – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 2001.

U.S. Environmental protection agency (EPA). **Greenhouse gas emissions estimation methodologies for biogenic emissions from selected source categories: solid waste disposal wastewater treatment ethanol fermentation**, 2010.

Google Earth software. 2015. Acesso em Maio de 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades: Minas Gerais – Pouso Alegre**. IBGE, 2010. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=315250>. Acesso em Maio de 2017.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. Rio de Janeiro: ABES, 4. ed., 932p., 2005.

JORDÃO, E.P; VOLSCHAN JR., I. **Tratamento de Esgotos Sanitários em Empreendimento Habitacionais**. 1. ed. Brasília: CAIXA, 2009, 132p

LOBATO, L. C. D. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico**. Belo Horizonte: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), 2011.

BRASIL.Ministério da ciência, tecnologia e inovação (MCTI). **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 3ª. Edição, 2016.

PEREIRA, J. C. **Motores e geradores - Princípios de funcionamento, instalação, operação e manutenção de grupos diesel geradores**. [ca. 2000]. 9-34 p. Disponível em: <<http://www.joseclaudio.eng.br/geradores/PDF/diesel2.pdf>>. Acesso em Março de 2017.

SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. Itajubá/MG: FUPAI, p.467, 2001.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnósticos dos serviços de água e esgotos**. Ministério das Cidades. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <[www.mcidades.gov.br](http://www.mcidades.gov.br)>. Acesso em Maio de 2017.

QUARMBY, J., Forster, C. F. **An examination of the structure of uasb granules**, Water Science Tech., 29, 2449-2454, 1995.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.