



APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS COMO PROPOSTA DE MELHORIA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS: UM ESTUDO DE CASO

Tuane Nascimento Mendes Aragão⁽¹⁾

Graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Salvador – UNIFACS. Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE) pela UNIFACS – Bolsista FAPESB.

Ícaro Thiago Andrade Moreira

Graduado em Ciências Biológicas, Mestre em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente (Departamento de Oceanografia/IGEO/UFBA) e Doutor em Geologia Ambiental e dos Recursos Hídricos (NEA/Departamento de Oceanografia/IGEO/UFBA). Pesquisador/Colaborador do Programa de Pós-Graduação em Energia (UNIFACS) e do Doutorado em Engenharia Química (UFBA).

Isadora Machado Marques

Graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Salvador – UNIFACS. Mestranda em Geoquímica do Petróleo e Meio Ambiente IGEO/NEA/UFBA – Bolsista CAPES.

Raiany Sandhy Souza Santos

Graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Salvador – UNIFACS. Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Urbano (PPDRU) pela UNIFACS – Bolsista FAPESB.

Endereço⁽¹⁾: R. Dr. José Peroba, , 251 - Costa Azul – Salvador - CEP: 40.140-110 - Brasil - Tel: +55 (71) 99146-8758 - e-mail: engtuane@gmail.com

RESUMO

No processo de tratamento anaeróbico de esgoto, alguns gases poluentes são gerados, formando o biogás. Nesta mistura de gases, encontra-se o metano (CH₄), que possui alto poder calorífico, agregando ao biogás um potencial energético. Objetivou-se quantificar o potencial de geração de energia proveniente do biogás produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), e estimar a emissão evitada de metano a partir do aproveitamento do biogás. Utilizou-se dados de



monitoramento de janeiro a julho de 2016 de uma ETE de propriedade da Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A - EMBASA. Os resultados foram: eficiência de remoção de DQO de 83,7%; produção de metano de $1.706,9 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$; energia elétrica disponível de $76.495,5 \text{ kWh} \cdot \text{mês}^{-1}$; emissão evitada de metano de $1.109,4 \text{ kgCH}_4 \cdot \text{dia}^{-1}$, portanto, o aproveitamento de biogás mostrou-se promissor.

Palavras-chave: Tratamento anaeróbio. Metano. Energia.

INTRODUÇÃO/OBJETIVOS

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2016), a matriz elétrica brasileira é predominantemente oriunda de fontes renováveis, destacando-se a supremacia da fonte hidráulica, responsável por 64,0% da oferta interna. No total, as fontes renováveis representam 75,5% da oferta interna de eletricidade no país. Destaca-se a importância do crescimento da matriz renovável no Brasil, e diante do cenário energético do país (crescimento da demanda, escassez de oferta e restrições financeiras, socioeconômicas e ambientais à expansão do sistema), torna-se indispensável também a utilização de fontes alternativas de energia.

No que tange ao tratamento de esgoto doméstico, a deficiência no processo é um agravante para o meio ambiente em âmbito nacional. Em alguns casos, o esgoto coletado nas cidades não é submetido a tratamento, sendo descartado em corpos hídricos, causando impactos negativos ao meio ambiente. O procedimento adequado para o tratamento de esgoto ocorre quando o efluente é direcionado à Estação de Tratamento, sendo submetido a uma série de processos, a fim de diminuir o seu potencial poluidor antes de retorná-lo ao meio ambiente (COSTA, 2006). O tratamento biológico de esgoto comumente utilizado no Brasil consiste no processo de decomposição anaeróbica da matéria orgânica em Digestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente (DAFA), com o intuito de reduzir a contaminação do efluente para disposição final, gerando como resíduos o lodo e o biogás (CHERNICHARO, 2001).

O biogás proveniente das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) é constituído essencialmente por metano, que é considerado um dos principais gases do efeito estufa (GENBIO, 2000). Referente ao tratamento de esgoto, quanto mais eficiente for a etapa de tratamento biológico, maior será a produção de metano, que confere ao biogás o potencial calorífico, resultando na capacidade de obtenção de energia (JIANG *et al.*, 2013; DENG, 2014).

Para que a produção de biogás ocorra em maior escala, é necessário que a ETE possua determinadas características, a exemplo do tratamento primário de esgoto, e o afluente deve ter



condições ideais para o metabolismo das bactérias metanogênicas, tais como impermeabilidade ao ar, composição do substrato, teor de água, temperatura e pH (PECORA, 2006). Destaca-se que o aproveitamento energético do biogás em ETEs está intimamente relacionado com a melhoria no processo de tratamento de efluentes, visto que para que este subproduto seja gerado no processo e possua potencial energético significativo, é fundamental que a etapa de tratamento biológico seja eficiente, além de estritamente anaeróbia reduzindo ao máximo a carga orgânica de chegada.

Alguns estudos comprovam os benefícios econômicos e ambientais advindos do aproveitamento energético de biogás em ETEs de diversas regiões do país. No estudo de caso realizado na ETE Santa Quitéria (Curitiba, Paraná), a produção de metano estimada foi de $1.427,2 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, equivalente à disponibilidade média de energia elétrica de $65.280,3 \text{ kWh} \cdot \text{mês}^{-1}$, correspondendo a 59% da demanda média mensal de energia da estação de tratamento (BILOTTA & ROSS, 2015). Na ETE situada na região noroeste de São Paulo, a estimativa de produção diária de biogás foi de 1.493 m^3 , sendo que desta quantia, $970,45 \text{ m}^3$ equivalem ao volume de metano (RODRIGUES *et al.*, 2011). No estudo de caso realizado na ETE Rio das Antas (Cascavel, Paraná), os principais resultados encontrados permitiram concluir que a produção diária de biogás foi de 624 m^3 , e a concentração média de gás metano de 74,8%, equivalente a $466,75 \text{ m}^3$, resultando no potencial de disponibilidade de energia elétrica de 35.459 kWh por mês (ZILLOTI, 2012).

Ao realizar o aproveitamento do biogás, é possível destacar dois resultados significativos: um direto, como energia elétrica e térmica; e um indireto, ao reduzir as emissões de GEEs e, com isso, reduzir o aquecimento global. Ressalta-se que o metano lançado na atmosfera é 21 vezes mais agressivo do que o dióxido de carbono, principal agente do aquecimento do planeta (BLEY JR, 2015).

Novas tendências inclinam-se, inclusive, para a quantificação da emissão evitada de metano em processos que geram biogás, ao realizar a recuperação do metano para produção de energia. A emissão evitada de metano está plenamente alinhada às diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Mudanças do Clima (Lei 12.187/2009), podendo, portanto, ser utilizada como um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Considerando a necessidade crescente de novas fontes de energia, os estudos referentes ao aproveitamento de biogás para fins energéticos em ETEs se tornaram uma nova perspectiva para a viabilidade do propósito, que já é justificado pela função ambiental e que somado à questão econômica, agrega ainda mais importância.

De acordo com informações da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, a proporção de domicílios que dispunham de serviços de rede coletora de esgoto passou de 63,5%, em 2014, para 65,3%, em 2015,



correspondendo a um incremento de 1,9 milhão de unidades domiciliares que passaram a possuir este serviço, totalizando 44,5 milhões de domicílios atendidos (IBGE, 2016). Por outro lado, a deficiência no tratamento do esgoto doméstico é um agravante para o meio ambiente em âmbito nacional. No Brasil, em 2015, apenas 42,7% dos esgotos gerados foram submetidos a tratamento, corroborando, portanto, a deficiência no tratamento de esgotos no país. Contudo, registra-se um crescimento de 1,9 ponto percentual quando comparado com o ano de 2014, que foi de 40,8%, dando continuidade à curva de crescimento do indicador e afirmando a tendência de aumento da abrangência de tratamento de esgoto no Brasil (SNIS, 2016).

Considerando que a prospecção de expansão e aumento da abrangência do aproveitamento de biogás em ETEs relaciona-se intimamente com o aumento da coleta e tratamento de efluentes domésticos, como pode ser evidenciado no panorama apresentado pelo SNIS (2016), nota-se uma gama de possibilidades referentes ao aumento da proporção de domicílios com disponibilidade de serviços de rede coletora de esgoto, acelerando o cenário demonstrado pelo IBGE e caracterizando o presente projeto como uma tecnologia de âmbito não apenas ambiental, mas também social. Além disso, ressalta-se que o projeto está alinhado com os objetivos globais da Organização das Nações Unidas - ONU propostos na Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, especialmente com o objetivo número 11 que refere-se a *“Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis”*, reduzindo até 2030 o impacto ambiental negativo *per capita* das cidades, prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros (ONU, 2015).

Diante deste cenário, a presente pesquisa apresenta resultados de um estudo de caso realizado numa ETE, objetivando avaliar a eficiência da produção de biogás durante o tratamento anaeróbico de esgoto, quantificar o metano constituinte do biogás gerado na ETE e conseqüentemente o potencial elétrico disponível, além de estimar a emissão evitada de metano proveniente do aproveitamento energético de biogás na ETE analisada.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada foi o estudo de caso realizado numa ETE, sendo segregada em três etapas:

- Revisão bibliográfica sobre o funcionamento de ETEs e dos aspectos referentes a biogás gerado nas estações;
- Estimativa da produção de metano e da energia disponibilizada pela ETE;



- Estimativa da emissão evitada de metano.

A ETE analisada localiza-se no Estado da Bahia, sendo de propriedade da Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. – EMBASA. O processo de tratamento de efluentes desta ETE é composto pela etapa preliminar e primária, em que o efluente é submetido à passagem por gradeamento e caixas de areia para remoção dos sólidos grosseiros, resíduos sólidos e areia, além do decantador primário; etapa secundária, com utilização de biodigestores do tipo DAFA, também conhecidos como reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*), onde ocorre a remoção da maior parte da carga orgânica. O efluente é distribuído por oito biodigestores, com volume útil de cada câmara de 1.440 m³; o lodo gerado nesta etapa é disposto em “fazendas de lodo”, e o biogás é coletado através de dutos para queima. A etapa terciária de tratamento é realizada a partir de lodos ativados, sendo composta por dois tanques de aeração, com volume útil de 9.016 m³, e quatro decantadores circulares.

Estimativa de produção de metano e energia elétrica da ETE

Foram utilizadas equações oriundas do modelo matemático desenvolvido por Lobato (2011) em sua tese de doutorado, cuja linha de pesquisa é semelhante. Considerando que algumas variáveis não são monitoradas na ETE analisada, optou-se por utilizar valores médios disponíveis na literatura e apresentados no Quadro 1, conforme já fora feito em outras pesquisas.

Quadro 1 - Variáveis não monitoradas na Estação de Tratamento de Esgoto analisada

Variáveis	Valores adotados
Concentração de SO ₄ no afluente (C _{SO4})	0,06 kgSO ₄ .m ⁻³
Eficiência de redução de Sulfato (Ef _{SO4})	75,0%
Coefficiente de Produção de Sólidos (Y)	0,15 kgDQO _{Lodo} .kgDQO _{Remov} ⁻¹
Perda de CH ₄ na fase gasosa (p _w)	5,0%
Outras perdas de CH ₄ na fase gasosa (p _o)	5,0%
Perda de CH ₄ dissolvido no efluente (p _L)	0,020 kg.m ⁻³
DQO consumida na redução de sulfato (K _{DQO-SO4})	0,667 kgDQO _{SO4} .kgSO ₄ ⁻¹
DQO correspondente a 1 mol de metano (K _{DQO})	0,064 kgDQO _{CH4} .mol ⁻¹
Fator de conversão teórico de DQO em CH ₄ (f _{CH4})	4,0 kgDQO.kgCH ₄ ⁻¹

Fonte: Lobato (2011).

A Tabela 1 apresenta as variáveis que foram monitoradas na ETE analisada, com exceção da temperatura do reator, que refere-se à média das temperaturas das amostras coletadas durante o período da análise.



Tabela 1 - Variáveis monitoradas na ETE analisada

Variáveis	Valores
Temperatura do Reator Biológico (T)	27 °C
Pressão Ambiente (P)	1 atm
Vazão Média Afluyente (QMédia)	12.785,6 m ³ .dia ⁻¹
DQO Média Afluyente ao UASB – entrada (DQOe)	9.063,1 kgDQOe.dia ⁻¹
DQO Média Efluyente ao UASB – saída (DQOs)	1.474,0 kgDQOs.dia ⁻¹

Fonte: EMBASA.

DQO convertida em lodo

Durante o processo de decomposição anaeróbica da matéria orgânica nos reatores UASB, nem toda parcela de DQO removida é convertida em metano, sendo necessário considerar as perdas, a exemplo da parcela de DQO que é retida no lodo e que pode ser estimada de acordo com a Equação 1.

$$DQO_{\text{Lodo}} = DQO_{\text{Remov}} \times Y \quad (1)$$

Em que:

DQO_{Lodo} : DQO convertida em biomassa (kgDQO_{Lodo}.dia⁻¹)

DQO_{Remov} : DQO removida do afluyente (kgDQO_{Remov}.dia⁻¹)

Y: Coeficiente de produção de sólidos (0,15 kgDQO_{Lodo}.kgDQO_{Remov}⁻¹)

DQO utilizada na redução de sulfato

Durante este processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de bactérias redutoras de sulfato (CHERNICHARO, 2007). Desta forma, primeiramente foi necessário calcular a estimativa da carga de sulfato reduzida a sulfeto:

$$CO_{SO_4 - \text{Conv}} = Q_{\text{Média}} \times C_{SO_4} \times Ef_{SO_4} \quad (2)$$

Em que:

$CO_{SO_4 - \text{Conv}}$: Concentração de SO₄ convertido em sulfeto (kgSO₄.dia⁻¹)

$Q_{\text{Média}}$: vazão média de esgoto afluyente (m³.dia⁻¹)

C_{SO_4} : Concentração de SO₄ no afluyente (0,06 kgSO₄.m⁻³)

Ef_{SO_4} : Eficiência de redução de sulfato (75%)

Posteriormente foi calculada a estimativa da carga de DQO utilizada na redução de sulfato:

$$DQO_{SO_4} = CO_{SO_4 - \text{Conv}} \times K_{DQO - SO_4} \quad (3)$$

Em que:

DQO_{SO_4} : DQO utilizada por bactérias redutoras de SO₄ (kgDQO_{SO_4}.dia⁻¹)



CO_{SO_4-Conv} : Concentração de SO_4 convertido em sulfeto ($kgSO_4.dia^{-1}$)

K_{DQO-SO_4} : DQO consumida na redução de sulfato ($0,667 kgDQO_{SO_4}.kgSO_4^{-1}$)

DQO convertida em metano

Para calcular a DQO convertida em metano, foi necessário determinar a massa diária de DQO convertida em metano, subtraindo da DQO removida no tratamento, a DQO retida no lodo e a DQO utilizada na redução de sulfato, conforme a seguir:

$$DQO_{CH_4} = DQO_{Remov} - DQO_{Lodo} - DQO_{SO_4} \quad (4)$$

Em que:

DQO_{CH_4} : DQO convertida em CH_4 ($kgDQO_{CH_4}.dia^{-1}$)

DQO_{SO_4} : DQO utilizada por bactérias redutoras de SO_4 ($kgDQO_{SO_4}.dia^{-1}$)

Produção volumétrica máxima de metano

A partir do resultado da Equação 4, foi realizado o cálculo da produção volumétrica máxima de metano, utilizando a seguinte equação:

$$\frac{Q_{CH_4} = DQO_{CH_4} \times R \times (273 \pm T)}{P \times K_{DQO} \times 1.000} \quad (5)$$

Em que:

Q_{CH_4} : Produção volumétrica máxima de CH_4 ($m^3.dia^{-1}$)

DQO_{CH_4} : DQO convertida em CH_4 ($kgDQO_{CH_4}.dia^{-1}$)

R: Constante dos gases ($0,08206 atm.L.mol^{-1}.K^{-1}$)

T: Temperatura do reator UASB ($27^\circ C$)

P: Pressão atmosférica (1 atm)

K_{DQO} : DQO correspondente a mol CH_4 ($0,064 kgDQO_{CH_4}.mol^{-1}$)

Perdas de metano

A produção volumétrica máxima de metano (Q_{CH_4}) é um valor teórico, visto que não considera as perdas de metano que ocorrem na fase líquida e gasosa. Com o intuito de aumentar a precisão dos resultados, foram calculadas as perdas típicas de metano dissolvido no efluente e no gás, bem como outras perdas, a exemplo de vazamentos e afins, conforme equações a seguir.

$$Q_{W-CH_4} = Q_{CH_4} \times p_w \quad (6)$$

$$Q_{O-CH_4} = Q_{CH_4} \times p_o \quad (7)$$



$$\frac{Q_L - CH_4 = Q_{Média} \times p_L \times f_{CH_4} \times R_{273 \pm T}}{P \times K_{DQO} \times 1000} \quad (8)$$

Em que:

Q_{W-CH_4} e Q_{O-CH_4} : Perdas de CH_4 na fase gasosa ($m^3.dia^{-1}$)

p_W e p_O : Perdas de CH_4 na fase gasosa (5,0%)

Q_{L-CH_4} : Perda de CH_4 dissolvido no efluente ($m^3.dia^{-1}$)

$Q_{Média}$: Vazão média de esgoto afluente ($m^3.dia^{-1}$)

p_L : Perda de CH_4 dissolvido no efluente ($0,020 \text{ kg.m}^{-3}$)

f_{CH_4} : Fator de conversão teórico de DQO em CH_4 ($4,0 \text{ kgDQO.kgCH}_4^{-1}$)

Produção de metano

De posse da produção volumétrica máxima de metano, e diante dos resultados das perdas calculadas, foi possível estimar o volume real de metano que será coletado para conversão em energia elétrica. A estimativa foi calculada de acordo com a Equação 9:

$$Q_{Real-CH_4} = Q_{CH_4} - Q_{W-CH_4} - Q_{O-CH_4} - Q_{L-CH_4} \quad (9)$$

Em que:

$Q_{Real-CH_4}$: Vazão de metano disponível ($m^3.dia^{-1}$)

Estimativa do potencial elétrico disponível

A partir do resultado da produção de metano, foi possível calcular a estimativa do potencial energético disponível na ETE analisada, utilizando as seguintes equações:

$$P_{CI_D} = P_{E_{CH_4}} \times P_{CI_{CH_4}} \times K \quad (10)$$

$$P_E = Q_{N-Real-CH_4} \times P_{CI_D} \times E_f \quad (11)$$

Em que:

P_{CI_D} : Poder calorífico inferior disponível ($kWh.Nm^{-3}$) (65,0% de CH_4)

$P_{E_{CH_4}}$: Peso específico do CH_4 ($1,1518 \text{ kg.Nm}^{-3}$)

$P_{CI_{CH_4}}$: Poder calorífico inferior do CH_4 ($4.831,1 \text{ kcal.kg}^{-1}$)

K: 4,19 $kWh/3600$ (conversão de unidades)

$Q_{N-Real-CH_4}$: Vazão disponível normalizada ($Nm^3.dia^{-1}$)

P_E : Potencial elétrico disponível ($kWh.dia^{-1}$)

E_f : eficiência de conversão de máquinas térmicas (25,0%)



O biogás produzido em reatores UASB é geralmente constituído por alto teor de metano, podendo chegar até 80,0%. Nesta pesquisa, adotou-se 65,0% de metano presente no biogás (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

Emissão evitada de metano

O cálculo da emissão de metano pautou-se no documento “*Orientações para Emissão de Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa*”, que apresenta equações para estimar as emissões de CH₄ derivadas do esgoto doméstico (IPCC, 2006), conforme Equação 12 a seguir:

$$E_{CH_4} = F_E(DQO_{Remov.} - DQO_{Lodo}) - R_{CH_4} \quad (12)$$

Em que:

E_{CH_4} : Emissão de CH₄ (kgCH₄.dia⁻¹)

F_E : Fator de emissão calculado (kgCH₄.kgDQO_{Remov.}⁻¹)

$DQO_{Remov.}$: DQO removida do afluente (kgDQO_{Remov.}.dia⁻¹)

DQO_{Lodo} : DQO convertida em biomassa (kgDQO_{Lodo}.dia⁻¹)

R_{CH_4} : CH₄ removido no aproveitamento energético (kg_{CH₄}.dia⁻¹)

Para calcular o fator de emissão (F_E), utilizou-se a produção mássica teórica de metano (Q_{CH_4} em kg.dia⁻¹) dividida pela DQO removida ($DQO_{Remov.}$), que se mostrou coerente com demais trabalhos da literatura. A parcela removida de metano no aproveitamento energético de biogás gerado na ETE analisada (R_{CH_4} teórico) foi calculada adaptando a equação dos gases ideais, conforme a seguir:

$$P \times V = n \times R \times (T \pm 273) \times MM_{CH_4} \quad (13)$$

Em que:

P: Pressão ambiente (1 atm)

V: Produção volumétrica diária de CH₄ (2.333,7 m³.dia⁻¹)

n: Produção mássica diária de CH₄ (kgCH₄.dia⁻¹)

R: Constante dos gases (0,08206 atm.L.mol⁻¹.K⁻¹)

T: Temperatura do reator UASB (27 °C)

MM_{CH_4} : Massa molecular de CH₄ (16 g.mol⁻¹)

O cálculo da emissão evitada de metano foi realizado inicialmente adotando-se “V”, como a produção volumétrica máxima de metano (Q_{CH_4}) e em seguida calculou-se a emissão evitada considerando “V” como a vazão disponível de metano ($Q_{Real-CH_4}$), para aproximar-se da realidade.



RESULTADOS/DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados dos cálculos realizados, a partir das equações que foram apresentadas na metodologia.

Tabela 2 - Resultado das variáveis calculadas

Variáveis	Resultados obtidos
DQO removida do afluente (DQO_{Remov})	7.589,1 kgDQO _{Remov} .dia ⁻¹
DQO convertida em CH ₄ (DQO_{CH_4})	6.067,0 kgDQO _{CH₄} .dia ⁻¹
Produção volumétrica máxima de CH ₄ (Q_{CH_4})	2.333,7 m ³ .dia ⁻¹
Perdas de CH ₄ na fase gasosa ($Q_{W-CH_4} + Q_{O-CH_4}$)	233,4 m ³ .dia ⁻¹
Perda de CH ₄ dissolvido no efluente (Q_{L-CH_4})	393,4 m ³ .dia ⁻¹
Vazão disponível ($Q_{Real-CH_4}$)	1.706,9 m ³ .dia ⁻¹
Vazão disponível normalizada ($Q_{N-Real-CH_4}$)	1.553,3 Nm ³ .dia ⁻¹
Poder calorífico inferior disponível do CH ₄ (PCI_D)	6,48 kWh.Nm ⁻³ *
Potencial Elétrico Disponível (P_E)	2.514,9 kWh.dia ⁻¹

Os valores apresentados nesta tabela referem-se aos resultados da aplicação das equações apresentadas na metodologia. *Considerando 65,0% de CH₄ no biogás: $PE_{CH_4} = 1,1518 \text{ kg.Nm}^{-3}$; $PCI_{CH_4} = 4.831,1 \text{ kcal.kg}^{-1}$.

A média de DQO removida (DQO_{Remov}) na ETE foi de 7.589,1 kgDQO_{Remov}.dia⁻¹, sendo possível verificar que a eficiência de remoção de DQO na ETE foi de 83,7% no período analisado. A faixa de eficiência típica de remoção de DQO em ETEs que possuem tratamento secundário e terciário, sendo o secundário composto por reator UASB, é de 65 a 90% (OLIVEIRA; VON SPERLING, 1995). Portanto, a ETE analisada encontra-se na faixa de eficiência típica de remoção de DQO.

A partir do resultado da média de DQO removida na ETE, calculou-se a produção volumétrica máxima de metano (Q_{CH_4}), resultando em 2.333,7 m³.dia⁻¹, sendo uma produção de metano teórica, pois não considera as perdas na fase líquida e gasosa. Visando aproximar-se das condições reais de produção de metano na Estação de Tratamento, foram calculadas as perdas, encontrando-se um total na fase gasosa de 233,4 m³.dia⁻¹, que somado às perdas de metano dissolvido no efluente que resultaram em 393,4 m³.dia⁻¹, representando um total de perdas de 626,8 m³.dia⁻¹. De posse das perdas calculadas, foi possível estimar a vazão disponível de metano em 1.706,9 m³.dia⁻¹.

Para normalizar a vazão disponível de metano, este resultado foi ajustado de acordo com pressão e temperatura padronizados, sendo 1 atm e 0 °C, respectivamente, obtendo-se uma vazão disponível normalizada de 1.553,3 Nm³.dia⁻¹. O resultado da vazão normalizada disponível de metano ($Q_{N-Real-CH_4}$) permitiu calcular o potencial elétrico disponível (P_E), resultando em 2.514,9 kWh.dia⁻¹.



Comparando o resultado da ETE analisada com o estudo realizado por Bilotta e Ross (2015) na ETE Santa Quitéria (Curitiba/Paraná), foi possível observar que a ETE analisada apresentou-se mais eficiente no parâmetro de produção volumétrica de metano (vazão disponível), pois as perdas na fase líquida e gasosa foram menores nesta estação, resultando numa vazão disponível ($Q_{\text{Real-CH}_4}$) de $1.706,9 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$, enquanto a ETE Santa Quitéria apresentou vazão disponível de $1.427,2 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$. Outro fator que justifica tal diferença na produção de metano é a eficiência de remoção de DQO das estações; enquanto a ETE analisada apresentou eficiência média de remoção de DQO de 83,7%, a ETE Santa Quitéria apresentou eficiência média de 65,6% nesta etapa do tratamento. Ressalta-se que a remoção de DQO em condições anaeróbicas é diretamente proporcional à produção de biogás.

Considerando a média dos dias do ano, adotou-se que um mês equivale a 30,4167 dias, logo, obteve-se um potencial de geração de energia elétrica mensal de $76.495,5 \text{ kWh.mês}^{-1}$ (adotando 65,0% de metano presente biogás). De acordo com dados disponíveis no Sistema de Gestão de Consumo de Energia da EMBASA, a média do consumo mensal da ETE analisada entre os meses de janeiro a julho de 2016 foi de $88.693,0 \text{ kWh.mês}^{-1}$, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Consumo mensal de energia elétrica na ETE

Meses	Consumo (kWh.mês^{-1})	Despesas (R\$)
Janeiro/2016	95.611,2	35.014,99
Fevereiro/2016	85.332,2	31.408,87
Março/2016	91.613,1	30.327,44
Abril/2016	85.060,9	26.314,25
Mai/2016	84.844,9	30.087,74
Junho/2016	89.041,4	32.636,02
Julho/2016	89.347,0	32.032,60
Média Jan. a Jun/2016	88.693,0	31.117,42

Fonte: EMBASA. Sistema de Gestão de Consumo de Energia – APOLO (2016).

Desta forma, conclui-se que o potencial elétrico disponível a partir do aproveitamento energético do biogás na ETE analisada representa 86,2% da média de consumo mensal da Estação de Tratamento.

Este resultado mostra-se significativo, visto que reflete numa possível redução na utilização da energia proveniente da concessionária de energia elétrica e conseqüentemente numa estimativa de redução de despesa com energia mensal na ETE de aproximadamente R\$ 26.838,00.

A partir dos dados da Tabela 3, elaborou-se um gráfico, conforme Figura 2, que elenca os consumos e despesas com energia elétrica na ETE durante o período analisado.



Figura 2 – Consumos e despesas com energia elétrica da ETE analisada durante o período de janeiro e julho de 2016



Fonte: Elaboração própria.

No que tange ao consumo de energia elétrica em estações de tratamento de esgoto, sabe-se que de 30% a 80% do consumo se concentra na fase biológica do processo de lodos ativados, sendo este o processo de tratamento de esgoto que mais demanda energia (WEF, 2002), justificando, portanto, a média de consumos de energia da ETE analisada e a importância de resultados promissores de projetos que visem reduzir o consumo de energia elétrica nas estações de tratamento.

Estimativa de emissão evitada de metano

A estimativa de emissão evitada de metano foi calculada com base nas equações 11 e 12, considerando alguns resultados calculados anteriormente, a exemplo da DQO convertida em biomassa (DQO_{Lodo}), DQO removida do efluente (DQO_{Remov}) e produção volumétrica de metano (Q_{CH_4}). Os resultados estão relacionados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado das variáveis calculadas na emissão de metano

Variáveis	Resultados Obtidos
Fator de Emissão Calculado (F_E)	0,20 $kgCH_4.kgDQO_{Remov}^{-1}$
DQO removida do afluente (DQO_{Remov})	7.589,1 $kgDQO_{Remov}.dia^{-1}$
DQO convertida em biomassa (DQO_{Lodo})	1.138,4 $kgDQO_{Lodo}.dia^{-1}$
CH_4 Removido no Aproveitamento Energético (R_{CH_4} Teórico)	1.516,8 $kgCH_4.dia^{-1}$
CH_4 Removido no Aproveitamento Energético (R_{CH_4} Calculado)	1.109,4 $kgCH_4.dia^{-1}$
Emissão Total de CH_4 (E_{CH_4} sem aproveitamento do biogás)	1.290,2 $kgCH_4.dia^{-1}$
Emissão Total de CH_4 (E_{CH_4} com aproveitamento do biogás)	180,8 $kgCH_4.dia^{-1}$

Os valores utilizados nos cálculos referem-se aos resultados da aplicação das equações apresentadas na metodologia.



O fator de emissão calculado de metano (F_E) foi comparado com valores adotados a partir de abordagens teóricas e experimentais da literatura, a exemplo de 0,21 – 0,25 $\text{kgCH}_4 \cdot \text{kgDQO}_{\text{Remov-1}}$ (USEPA, 1997). Portanto, o F_E calculado nesta pesquisa mostrou-se coerente com outros trabalhos da literatura.

O cálculo da parcela de metano removido no aproveitamento energético do biogás (R_{CH_4}) foi realizado duas vezes, sendo a primeira utilizando a produção volumétrica máxima de metano (Q_{CH_4}), considerada como uma produção teórica, e a segunda utilizando a vazão disponível de metano ($Q_{\text{Real-CH}_4}$), considerada como a produção real de metano. A primeira situação resultou em 1.516,75 $\text{kgCH}_4 \cdot \text{dia}^{-1}$ (R_{CH_4} Teórico) e a segunda situação resultou em 1.109,37 $\text{kgCH}_4 \cdot \text{dia}^{-1}$ (R_{CH_4} Calculado). O resultado da segunda situação aproxima-se mais da realidade, pois considera as perdas de metano que ocorrem na fase líquida e gasosa, bem como a parcela consumida pelas bactérias na conversão de sulfato em sulfeto durante o processo de tratamento de esgoto (CHERNICHARO, 2007).

Conhecendo o resultado da massa de metano removida no aproveitamento energético de biogás, foram calculados dois cenários para a emissão de metano: o primeiro sem a existência do aproveitamento do biogás e o segundo com a recuperação deste. A partir destes resultados, observou-se que o aproveitamento do biogás pode reduzir a emissão total de metano (E_{CH_4}) de 1.290,2 $\text{kgCH}_4 \cdot \text{dia}^{-1}$ para 180,8 $\text{kgCH}_4 \cdot \text{dia}^{-1}$ na Estação de Tratamento de Esgoto analisada, logo, a emissão evitada de metano resulta em 1.109,4 $\text{kgCH}_4 \cdot \text{dia}^{-1}$.

Fazendo uma análise comparativa com a pesquisa de Bilotta e Ross (2015), que foi utilizada como base para o estudo em questão, foi possível observar que, semelhantemente, a ETE Santa Quitéria apresentou redução na emissão total de metano (E_{CH_4}) de 1.549,5 $\text{kgCH}_4 \cdot \text{dia}^{-1}$ para 603,3 $\text{kgCH}_4 \cdot \text{dia}^{-1}$, resultando numa emissão efetivamente evitada de metano com o aproveitamento de biogás de 946,2 $\text{kgCH}_4 \cdot \text{dia}^{-1}$, sendo também considerado um resultado significativo.

A discrepância entre os resultados da ETE analisada e ETE Santa Quitéria pode ser justificada pela grande diferença de vazão média das estações de tratamento analisadas, pois a ETE Santa Quitéria possui aproximadamente o dobro da vazão média da ETE analisada, justificando, portanto, maior parcela de emissão de metano na ETE Santa Quitéria, mesmo com o aproveitamento do biogás.

A emissão evitada de metano é uma importante ferramenta das práticas de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), sendo este o único mecanismo do Protocolo de Quioto que admite a participação voluntária de países em desenvolvimento. Os países que implantam projetos de MDL podem vender as emissões evitadas de GEE, chamadas de Reduções Certificadas de Emissão – RCEs (MCTI, 2014). O aproveitamento energético de biogás na ETE analisada, portanto, pode resultar em obtenção de RCEs após o projeto ser submetido a etapas legais, cumprindo as metas e compromissos de redução de GEE do país.



CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, pode-se afirmar que o aproveitamento energético do biogás gerado na Estação de Tratamento de Esgoto que foi objeto de estudo desta pesquisa resultará em benefícios ambientais, uma vez que haverá redução de emissão de metano para a atmosfera; e ainda em benefícios econômicos, considerando que haverá redução de despesas com energia elétrica da estação. Do ponto de vista social, estes resultados abrem possibilidades para que efetivamente ocorra o aproveitamento energético de biogás em Estações de Tratamento de Esgoto, criando oportunidades para implantação de novas ETEs em diversas cidades que ainda não dispõem de coleta e tratamento de efluentes, aumentando a proporção de domicílios com disponibilidade destes serviços de saneamento, tornando as cidades mais sustentáveis e atendendo aos objetivos globais de desenvolvimento sustentável propostos pela ONU.

REFERÊNCIAS

- BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L. **Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos.** Eng. Sanit. Ambient. Curitiba: Paraná vol. 21 nº 2, p. 275-282, abr/jun. 2016.
- BLEY JR, C. 2015. **Biogás: a energia invisível.** [Prefácio de Leonardo Boff] – 2 ed. rev. e ampl. São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional.
- CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Medidas mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica.** Brasília: Dupligráfica Editora, 2000. 222 p. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0005/5179.pdf> Acesso em: 10 abr. 2017.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.** 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- DENG, Y.; XU, J.; LIU, Y.; MANCL, K. **Biogas as a sustainable energy source in China: Regional development strategy application and decision making.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 35, p. 294-303, jul. 2014.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional, 2017 – ano base 2016.** Disponível em:



<https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf> Acesso em: 24 mar. 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD, 2016 – ano base 2015.** Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv98887.pdf>> Acesso em: 04 jun. 2017.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.** EGGLESTON, H. S. et al. Published: IGES, Japan, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>>. Acesso em: 11 mai. 2017.

JIANG, X.; HAYASHI, J.; SUN, Z. Y.; YANG, L.; TANG, Y. Q.; OSHIBE, H.; OSAKA, N.; KIDA, K. Improving biogas production from protein-rich distillery wastewater by decreasing ammonia inhibition. **Process Biochemistry**, vol. 48, nº 11, p. 1778-1784, nov. 2013.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico.** 2011. 187 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

OLIVEIRA, S. M. A.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1 - análise de desempenho. In: VIII SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Artigo Técnico. Fortaleza – Ceará, 2005. 347-357 p.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Agenda 2030: 17 objetivos globais de desenvolvimento sustentável.** 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>> Acesso em: 25 jul. 2017.

PECORA, Vanessa. **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. 153f. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

SANTOS, N. S. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na Estação de Tratamento de Esgotos de Madre de Deus – Bahia.** 2009. 61 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Faculdade de Tecnologia e Ciências, Salvador: Bahia, 2009.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos, 2016 – ano base 2015.** Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2015>> Acesso em: 04 jun. 2017.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente.** Campina Grande – PB, 1994.