

Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos

Estimate of energy generation and of greenhouse gas emission on biogas recovery from wastewater treatment plant

Patrícia Bilotta¹, Bárbara Zaniccotti Leite Ross²

RESUMO

O aproveitamento do biogás proveniente do tratamento de esgoto doméstico, de dejetos animais e da disposição de resíduos sólidos é uma alternativa de geração de energia elétrica com grande potencial de expansão no Brasil. O objetivo deste trabalho foi quantificar a energia fornecida pelo biogás gerado em uma estação de tratamento de esgotos (ETE) e estimar a emissão evitada de gases de efeito estufa (GEEs) com a recuperação do biogás. A ETE analisada possui vazão 33,220,8 m³.d⁻¹ e DQO afluente 14,617,1 kg.d⁻¹ e atende a cerca de 190.000 habitantes. Foram utilizados dados de monitoramento de agosto de 2012 a março de 2013 para quantificar os seguintes parâmetros: demanda química de oxigênio (DQO) convertida em biomassa; sulfato convertido em sulfeto; DQO convertida em metano; perdas de metano (fase líquida e gasosa); potencial energético disponível; potência elétrica disponível; emissão evitada de metano. Os seguintes resultados foram obtidos: eficiência média de tratamento de 65,6%; produção de metano de 1,427,2 m³.d⁻¹; energia elétrica média disponível de 65,280,3 kWh.mês⁻¹ (59% da demanda média mensal de energia da estação); emissão real evitada de metano de 946,2 kgCH₄.d⁻¹ e 17,192,6 kgCO₂_{eq}.d⁻¹ (potencial de aquecimento global – PAG – do CH₄=21). Pode-se concluir que a recuperação do biogás na ETE Santa Quitéria resultaria em benefícios econômicos e ambientais.

Palavras-chave: biogás; tratamento de esgoto; energia; gases de efeito estufa.

ABSTRACT

The use of biogas from treatment of domestic sewage, animal waste and solid waste disposal is an alternative to generate electricity with great potential for expansion in Brazil. The aim of this paper is quantifying the energy from the biogas produced in a wastewater treatment plant (WWTP) and estimating the greenhouse gas emission avoided with the biogas recovery. The WWTP evaluated has flow 33,220.8 m³.d⁻¹ and COD 14,617.1 kg.d⁻¹ and serves about 190,000 inhabitants. It was used monitoring data from August/2012 to March/2013 to quantify the following parameters: COD converted into biomass; sulfate converted to sulfide; COD converted to methane; methane loss (liquid and gas); potential energy available; electrical power available; avoided emissions of methane. The following results were obtained: average treatment efficiency of 65.6%; methane production of 1,427.2 m³.d⁻¹; average electricity available of 65,280.3 kWh.month⁻¹ (59% of the average monthly energy demand of the WWTP); avoided emissions of 941.9 kgCH₄.d⁻¹ and 17,189.7 kgCO₂_{eq}.d⁻¹. Therefore, it can be concluded that the biogas recovery of in Santa Quitéria WWTP can result in economic and environmental benefits.

Keywords: biogas; wastewater treatment; energy; greenhouse gas.

INTRODUÇÃO

De acordo com o último balanço energético nacional, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia primária aumentou cerca de 72% nos últimos 10 anos no Brasil (EPE, 2013a). Além disso, em termos de energia elétrica, foi registrado um

aumento em torno de 87% no consumo nacional no período de 2008 a 2012 (EPE, 2013b). Para atender à demanda crescente, outras fontes renováveis têm sido incorporadas à matriz energética brasileira, como eólica, biomassa, centrais hidrelétricas de pequeno porte e biogás (EPE, 2013a).

¹Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Professora e Pesquisadora Titular no Programa de Mestrado e Doutorado da Universidade Positivo - Curitiba (PR), Brasil.

²Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) - Curitiba (PR), Brasil.

Endereço para correspondência: Patrícia Bilotta - Rua Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5.300 - Campo Comprido - 81280-330 - Curitiba (PR), Brasil - E-mail: pb.bilotta@gmail.com

Recebido: 08/10/14 - **Aceito:** 22/07/15 - **Reg. ABES:** 141477

O gás metano (CH_4), responsável pela capacidade calorífica do biogás, é produzido na degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica, com a formação de amônia, dióxido de carbono, hidrogênio, monóxido de carbono, nitrogênio, compostos orgânicos voláteis, sulfetos e fosfatos (COSTA, 2006; GARCILASSO *et al.*, 2008a). A proporção entre esses componentes depende do tipo de tratamento biológico e do substrato utilizado, que pode ser resíduo sólido urbano, esgoto doméstico, lodo de tratamento de esgoto, dejetos animal, dentre outros (GARCILASSO *et al.*, 2008a; VENKATESCH & ELMI, 2013).

No caso do esgoto sanitário, quanto maior a eficiência do tratamento biológico, maior será a produção de CH_4 pelo sistema e maior será a capacidade de obtenção de energia (JIANG *et al.*, 2013; DENG *et al.*, 2014). Segundo Tchobanoglous *et al.* (2003), o metano pode ser obtido em diferentes configurações de tratamento anaeróbio de esgoto, como reator de manta de lodo, reator de leito fluidizado, filtro biológico, entre outras.

Alguns fatores podem interferir no poder calorífico inferior (PCI) do biogás, como: temperatura ambiente (faixa ideal 32 a 37°C), qualidade do esgoto sanitário (biodegradabilidade dos compostos orgânicos, presença de nitrogênio, enxofre, fósforo, pH entre 6,0 e 8,0) e quantidade de vapor de água e CO_2 (quanto maior a parcela de vapor de água e CO_2 , menor o poder calorífico) (COSTA, 2006; FARIA, 2012). Segundo Zilotti (2012), o PCI do metano pode passar de 465 para 11.661 kcal.kg⁻¹ quando a concentração de CO_2 é reduzida de 90 para 10% no biogás.

A legislação brasileira prevê a concessão de direito de exploração da eletricidade proveniente do biogás, seja para autoprodutores (energia destinada ao consumo próprio) ou produtores independentes (energia excedente comercializada). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) autoriza essas ações nos termos das Leis n° 9.427/96 e n° 9.074/95, bem como da Resolução n° 390/09 (BRASIL, 1995; BRASIL, 1996; ANEEL, 2009; MMA, 2010).

A geração de energia elétrica a partir do biogás é uma alternativa com grande potencial de expansão no Brasil. Isso se deve a alguns fatores, como: ampliação nos serviços de coleta e tratamento de esgoto sanitário no território nacional (atualmente apenas cerca de 25% da população brasileira é beneficiada por esses serviços) e de coleta e destinação adequada de resíduos sólidos urbanos (SNIS, 2012); aumento da fiscalização por parte dos órgãos ambientais para o cumprimento da legislação de descarte de efluentes domésticos e industriais em cursos d'água (BRASIL, 2011); aumento do consumo de energia elétrica no país nos próximos anos, aumentando a pressão sobre a oferta nacional e sobre o custo da energia elétrica fornecida (EPE, 2013b).

Nesse contexto, foi investigada neste trabalho a capacidade de geração de energia elétrica a partir do gás metano produzido em

estação de tratamento de esgotos (ETE), bem como foi estimada a emissão evitada de gases de efeito estufa (GEEs) com a recuperação do biogás.

A pesquisa foi realizada na ETE Santa Quitéria, localizada na região metropolitana de Curitiba, cuja instalação atende a uma população de aproximadamente 190.000 habitantes. Para alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- quantificar a geração de metano na ETE Santa Quitéria;
- calcular a energia disponibilizada pela ETE Santa Quitéria;
- estimar a redução no consumo de energia com o aproveitamento do biogás;
- calcular a emissão de metano evitada pela recuperação do biogás.

A justificativa para a realização deste estudo se apoia em três aspectos principais:

1. crescente demanda urbana por energia elétrica, que requer fontes alternativas;
2. potencial energético intrínseco do biogás gerado em ETEs anaeróbias, ainda pouco aproveitado no Brasil;
3. possibilidade de atender às demandas urbanas de energia elétrica localizadas nas proximidades da fonte geradora.

CONTEXTUALIZAÇÃO

O biogás é uma mistura de gases resultantes das reações bioquímicas de decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente no esgoto doméstico. Sua composição é: CH_4 (40 a 90%), CO_2 (10 a 50%), H_2 (0 a 3%), N_2 (0 a 2,5%), O_2 (0 a 1%), H_2S (0 a 3%), NH_3 (1 a 0,5%) e CO (0 a 0,1%). A quantidade de cada componente depende das condições de operação da ETE e das características físico-químicas do esgoto bruto, como tempo de retenção, temperatura, pH e relação carbono-nitrogênio-fósforo (COELHO *et al.*, 2004; COSTA, 2006; LOBATO, 2011).

Chernicharo (2007) afirma que no tratamento anaeróbio a carga orgânica afluente é convertida nas seguintes parcelas: biogás (50 a 80%), efluente (0 a 30%) e lodo (10 a 20%). Farias (2012) relata que, na prática, a relação máxima é 0,25 kg CH_4 por 1 kg de demanda biológica de oxigênio ($\text{DBO}_{5,20}$) removida. Lobato (2011) destaca que a perda de CH_4 no efluente e para a atmosfera pode variar de 20 a 50% do metano total. Essas informações auxiliam na estimativa da produção de metano de uma ETE quando não há dados de medição.

Para aumentar o rendimento energético e a vida útil do sistema de conversão do CH_4 em energia elétrica é necessário instalar filtros purificadores de biogás na saída de gás do reator biológico. Os filtros removem umidade (vapor de água que absorve parte da energia gerada na combustão do CH_4), H_2S (responsável por corrosão no sistema) e CO_2 (gás inerte que reduz o poder calorífico do biogás) (COELHO

et al., 2004; COELHO *et al.*, 2006; FRANÇA JUNIOR, 2008; VARNERO *et al.*, 2012). Em seu estudo, Zilotti (2012) mostra que a combustão de 1 Nm³ de biogás, com 65% de CH₄ na mistura, libera 23.400 kJ de calor, enquanto 1 Nm³ de CH₄ produz 36.000 kJ.

Vários trabalhos relatam os benefícios econômicos da utilização de biogás na geração de energia em pequenas e grandes cidades (FRANÇA JUNIOR, 2008; GARCILASSO *et al.*, 2008a; GARCILASSO *et al.*, 2008b; DENG *et al.*, 2014). Na ETE Barueri (São Paulo), o aproveitamento do biogás responde por 25% da demanda mensal de energia para o funcionamento da estação (COSTA, 2006). Na ETE Rio das Antas (Cascavel, Paraná), a geração de energia elétrica pelo biogás foi estimada em 35.459 kWh mensal, valor suficiente para atender à demanda elétrica da estação de tratamento de água do município (ZILOTTI, 2012).

O aproveitamento energético do biogás também promove a redução de emissão GEEs. O potencial de aquecimento global (PAG) do CH₄ é 21 vezes superior ao CO₂; assim, a combustão do CH₄ para produzir energia pode reduzir a tonelada de CO_{2eq} lançado para a atmosfera (IPCC, 2013). Dessa forma, é possível adquirir certificados de redução de emissão de GEEs (RCEs), comercializados de acordo com os critérios do Protocolo de Quioto (GARCILASSO *et al.*, 2008b), muito embora o valor dos RCEs esteja em baixa no mercado de carbono (preço mínimo 2,70 €/tCO₂ no último leilão da BM&F BOVESPA em 2012), o que torna sua comercialização, no momento, pouco atrativa.

METODOLOGIA

Este trabalho apresenta uma abordagem de estudo de caso e foi organizado em duas etapas:

1. estimativa da produção de metano e da energia disponibilizada pela ETE Santa Quitéria;
2. cálculo da emissão evitada de metano.

Caracterização do local de estudo

A ETE Santa Quitéria está localizada no bairro Campo Comprido (Curitiba), nas coordenadas 25°27'46"S e 49°19'14"W, e ocupa uma área de 10.000 m². A estação atende a cerca de 190.000 habitantes e opera com vazão média de 420 L.s⁻¹. Sua configuração é composta por tratamento preliminar (remoção de sólidos grosseiros — resíduos sólidos e areia) e tratamento secundário (remoção de carga orgânica), como mostra a Figura 1. O lodo removido dos reatores biológicos é encaminhado para secagem em adensador e centrífuga, enquanto o biogás é coletado em tubulações e levado aos queimadores abertos. O tratamento secundário consiste na distribuição do esgoto por seis reatores anaeróbios de leite fluidizado (RALFs), com volume de 2.000 m³ e capacidade para tratar 70 L.s⁻¹ cada. O efluente dos RALFs é bombeado para quatro flotoadores, para remoção de sólidos suspensos, e o efluente final é descartado no Rio Barigüi. O tempo de detenção hidráulica nos RALFs é de 8 h e não há recirculação de lodo biológico.

Metodologia adotada

A produção de metano foi estimada a partir do relatório de monitoramento de vazão (afluente), DQO (afluente e efluente) e temperatura ambiente entre os meses de agosto de 2012 e março de 2013. Os dados foram disponibilizados pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

Nos cálculos de produção de metano e estimativa de geração de energia foram adotadas as metodologias descritas por

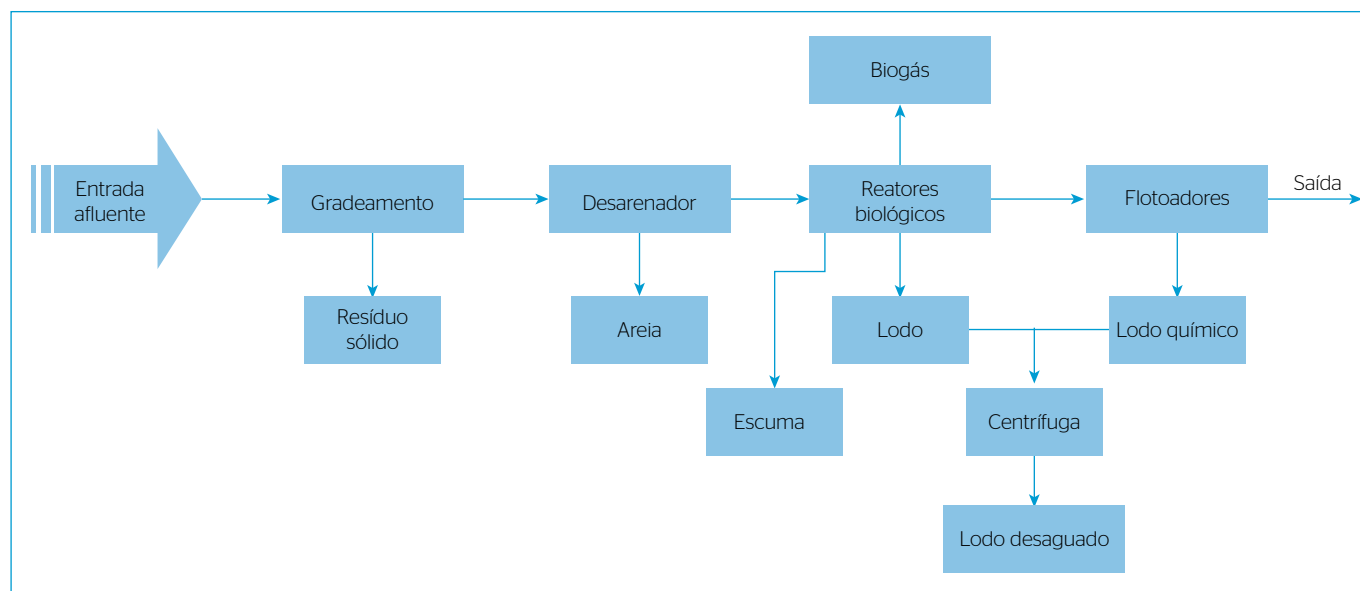


Figura 1 - Fluxograma das unidades de tratamento da estação de tratamento de esgotos Santa Quitéria.

Lobato (2011) e Zilotti (2012), já a emissão de metano evitada foi determinada pelo método do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006). Na Tabela 1 são relacionadas as equações utilizadas nos cálculos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de metano e energia disponibilizada

Algumas variáveis necessárias para se estimar a produção de metano e o potencial energético disponibilizado por ETEs não são monitoradas pela ETE Santa Quitéria; nesse caso, foram adotados valores médios obtidos da literatura (Tabela 2).

As variáveis monitoradas pela ETE Santa Quitéria, e seus respectivos valores médios, são apresentadas na Tabela 3. O cálculo de produção de metano e estimativa energética se baseia no levantamento de dados da estação de tratamento entre os meses de agosto de 2012 e março de 2013.

Tabela 2 - Variáveis não monitoradas pela estação de tratamento de esgotos Santa Quitéria.

Variáveis	Valores adotados
Concentração de SO ₄ no afluente (CO _{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} . ⁻¹ .kgDQO _{Remov}
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 corresponde 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

DQO: demanda química de oxigênio.

Fonte: Valores obtidos a partir de estudos realizados por Lobato (2011).

Tabela 1 - Equações utilizadas nos cálculos de produção de metano, geração de energia e emissão de metano evitada.

Parâmetros	Equações	Variáveis
DQO convertida em biomassa	$DQO_{Lodo} = DQO_{Remov} \cdot Y$	DQO _{Lodo} : DQO convertida em biomassa (kgDQO _{Lodo} .d ⁻¹) DQO _{Remov} : DQO removida do afluente (kgDQO _{Remov} .d ⁻¹) Y: coeficiente de produção de sólidos (kgDQO _{Lodo} .kgDQO _{Remov} ⁻¹)
DQO utilizada na redução de sulfato	$DQO_{SO4} = CO_{SO4-Corv} \cdot K_{DQO-SO4}$	DQO _{SO4} : DQO utilizada por bactérias redutoras de SO ₄ (kgDQO _{SO4} .d ⁻¹) CO _{SO4-Corv} : concentração de SO ₄ convertido em sulfeto (kgSO ₄ .d ⁻¹) K _{DQO-SO4} : DQO consumida na redução de sulfato (kgDQO _{SO4} .kgSO ₄ ⁻¹)
Sulfato convertido em sulfeto	$CO_{SO4-Corv} = Q_{Média} \cdot C_{SO4} \cdot Ef_{SO4}$	Q _{Média} : vazão média de esgoto afluente (m ³ .d ⁻¹) C _{SO4} : concentração de SO ₄ no afluente (kgSO ₄ /m ³) Ef _{SO4} : eficiência de redução de sulfato (%)
DQO convertida em CH ₄	$DQO_{CH4} = DQO_{Remov} - DQO_{Lodo} - DQO_{SO4}$	DQO _{CH4} : DQO convertida em CH ₄ (kgDQO _{CH4} .d ⁻¹) DQO _{SO4} : DQO utilizada por bactérias redutoras de SO ₄ (kgDQO _{SO4} .d ⁻¹)
	$Q_{CH4} = \frac{DQO_{CH4} \cdot R \cdot (273 \pm T)}{P \cdot K_{DQO} \cdot 1,000}$	Q _{CH4} : produção volumétrica máxima de CH ₄ (m ³ .d ⁻¹) R: constante dos gases (0,08206 atm.L.mol ⁻¹ .K ⁻¹) T: temperatura operacional do reator (°C) P: pressão atmosférica (atm) K _{DQO} : DQO para 1 mol de metano (kgDQO _{CH4} .mol ⁻¹)
Perdas de CH ₄	$Q_{W-CH4} = Q_{CH4} \cdot p_w$ $Q_{O-CH4} = Q_{CH4} \cdot p_o$ $Q_{L-CH4} = \frac{Q_{Média} \cdot p_L \cdot f_{CH4} \cdot R \cdot (273 \pm T)}{P \cdot K_{DQO} \cdot 1,000}$	Q _{W-CH4} e Q _{O-CH4} : perdas de CH ₄ na fase gasosa (m ³ .d ⁻¹) p _w e p _o : perdas de CH ₄ na fase gasosa (%) Q _{L-CH4} : perda de CH ₄ dissolvido no efluente (m ³ .d ⁻¹) p _L : perda de CH ₄ dissolvido no efluente (kg.m ³) f _{CH4} : fator de conversão teórico de DQO em CH ₄ (kgDQO.kgCH ₄ ⁻¹)
	$Q_{Real-CH4} = Q_{CH4} - Q_{W-CH4} - Q_{O-CH4} - Q_{L-CH4}$	Q _{Real-CH4} : vazão disponível (m ³ .d ⁻¹)
Potência elétrica disponível	$PCI_D = PE_{CH4} \cdot PCI_{CH4} \cdot K$ $P_E = Q_{N-Real-CH4} \cdot PCI_D \cdot Ef$	PCI _D : poder calorífico inferior disponível (kWh/Nm ³) (65% de CH ₄) PE _{CH4} : peso específico do CH ₄ (kg.Nm ⁻³) PCI _{CH4} : poder calorífico inferior do CH ₄ (kcal.kg ⁻¹) K: 4,19 kWh/3600 (conversão de unidades) Q _{N-Real-CH4} : vazão disponível normalizada (Nm ³ .d ⁻¹) P _E : potência elétrica disponível (kWh.d ⁻¹) Ef: eficiência de conversão de máquinas térmicas (0,25)

DQO: demanda química de oxigênio.

Fonte: Adaptado de Lobato (2011), Zilotti (2012) e IPCC (2006).

Utilizando-se as Equações da Tabela 1 e as informações indicadas nas Tabelas 2 e 3 foi possível calcular as variáveis requeridas na estimativa da produção de metano e da energia disponibilizada pela ETE Santa Quitéria.

A Tabela 4 mostra o resultado do cálculo das variáveis utilizadas nesta etapa da pesquisa. A parcela que corresponde à DQO removida (DQO_{Remov}) nos reatores *upflow anaerobic sludge blanket* (UASB) foi determinada subtraindo-se a DQO média efluente (DQO_e) da DQO média afluyente (DQO_a).

A eficiência média de remoção da matéria orgânica presente no esgoto bruto foi calculada em 65,6%, considerando-se os dados de monitoramento da estação. A partir do valor médio de DQO removida do afluyente de 9.594,7 kgDQO_{Remov}.d⁻¹ foi possível estimar a produção de metano em 1.427,2 m³.d⁻¹ e o potencial de geração de energia elétrica na ETE Santa Quitéria em 65.280,3 kWh.mês⁻¹. Nos cálculos foi considerado: 1 mês=30,4167 dias.

Tabela 3 - Variáveis monitoradas pela estação de tratamento de esgotos Santa Quitéria.

Variáveis	Valores medidos
Temperatura do reator biológico (T)	21,1±2,1 °C
Pressão ambiente (P)	1,0 atm
Vazão média afluyente ($Q_{Média}$)	33.220,8±3.896,6 m ³ .d ⁻¹
DQO média afluyente ao UASB - entrada (DQO _e)	14.617,1±4.508,1 kgDQOe.d ⁻¹
DQO média do efluente ao UASB - saída (DQO _s)	5.022,4±1.410,1 kgDQOs.d ⁻¹

DQO: demanda química de oxigênio.
Fonte: Sanepar.

Tabela 4 - Resultado das variáveis calculadas.

Variáveis	Valores obtidos
DQO removida do afluyente (DQO_{Remov})	9.594,7 kg DQO _{Remov} .d ⁻¹
DQO convertida em CH ₄ (DQO_{CH4})	7158,4 kgDQO _{CH4} .d ⁻¹
Produção volumétrica máxima de CH ₄ (Q_{CH4})	2.699,4 m ³ .d ⁻¹
Perdas de CH ₄ na fase gasosa ($Q_{W-CH4} + Q_{O-CH4}$)	270,0 m ³ .d ⁻¹
Perda de CH ₄ dissolvido no efluente (Q_{L-CH4})	1.002,2 m ³ .d ⁻¹
Vazão disponível ($Q_{Real-CH4}$)	1.427,2 m ³ .d ⁻¹
Vazão disponível normalizada ($Q_{N-Real-CH4}$)	1.324,8 m ³ .d ⁻¹
Poder calorífico inferior disponível do CH ₄ (PCI_D)	6,48 kWh.Nm ³ *
Potência elétrica disponível (P_e)	2.146,2 kWh.d ⁻¹

Os valores são resultado da aplicação das equações indicadas na Tabela 1.
*Considerando 65% de CH₄ no biogás: $PE_{CH4}=1,1518$ kg.Nm⁻³; $PCI_{CH4}=4,8311$ kcal.kg⁻¹.
DQO: demanda química de oxigênio.

Para o cálculo do poder calorífico inferior disponibilizado pelo CH₄ (PCI_D), foi adotada a parcela de 65% de metano no biogás (ZILOTTI, 2012), assumindo-se uma baixa conversão da matéria orgânica em metano. Todavia, quanto maior a parcela de metano na mistura gasosa, maior será a capacidade calorífica do biogás, e maior será a potência elétrica (P_e) disponibilizada pela estação.

Portanto, se a parcela de CH₄ for elevada de 65 para 75%, a P_e disponível passaria de 65.280,3 para 75.252,9 kWh.mês⁻¹, o que representa um acréscimo de 13,2% na quantidade de energia disponibilizada pela estação.

Consumo de energia

O consumo mensal de energia elétrica na ETE Santa Quitéria durante o período de investigação foi obtido a partir de dados fornecidos pela Sanepar. O resultado do levantamento dessas informações está indicado na Tabela 5.

Visto que a potência elétrica média disponibilizada pela ETE Santa Quitéria foi estimada em 65.280,3 kWh.mês⁻¹ (65% de metano no biogás) e que o consumo médio mensal de energia na ETE foi medido em 110.405 kWh.mês⁻¹, é possível concluir que a energia proveniente do metano gerado na estação corresponde a aproximadamente 59% do consumo médio mensal da unidade.

Esse valor representa uma redução significativa na demanda externa de energia elétrica para o funcionamento das instalações da ETE Santa Quitéria, resultando em benefício econômico direto para a companhia de saneamento.

Emissão de metano evitada

Para calcular a emissão de metano evitada na ETE Santa Quitéria com o aproveitamento energético do biogás, foram utilizados o resultado do cálculo de produção de metano (descrito acima), a Equação 1, e

Tabela 5 - Consumo mensal de energia elétrica na estação de tratamento de esgotos Santa Quitéria.

Ano	Mês	Energia consumida (kwh.mês ⁻¹)
2012	Agosto	108.877
	Setembro	124.969
	Outubro	156.994
	Novembro	113.245
	Dezembro	70.689
2013	Janeiro	115.022
	Fevereiro	111.050
	Março	82.395
Valor médio		110.405 ± 26.122 kWh.mês ⁻¹ *

*Considerando-se: 1 mês=30,4167 d (valor médio no período de 1 ano).

os dados apresentados nas Tabelas 3 e 4. O resultado dos cálculos das variáveis consideradas neste estudo está indicado na Tabela 6.

$$E_{CH_4} = F_E \cdot (DQO_{Remov} - DQO_{Lodo}) \cdot R_{CH_4} \quad (1)$$

Onde:

E_{CH_4} : emissão de CH_4 ($kgCH_4 \cdot d^{-1}$)

F_E : fator de emissão calculado ($kgCH_4 / kgDQO_{Remov}^{-1}$)

R_{CH_4} : CH_4 removido no aproveitamento energético ($kgCH_4 \cdot d^{-1}$)

DQO_{Lodo} : DQO convertida em biomassa ($kgDQO_{Lodo} \cdot d^{-1}$)

DQO_{Remov} : DQO removida do afluente ($kgDQO_{Remov} \cdot d^{-1}$)

O fator de emissão (F_E) foi calculado a partir da produção mássica máxima de metano (Q_{CH_4} em $kg \cdot d^{-1}$) dividida pela DQO removida no tratamento ($DQO_{Remov} \cdot d^{-1}$). O valor obtido para F_E é coerente com o que outros trabalhos têm reportado na literatura (0,19 a 0,22 $kgCH_4 / kgDQO_{Remov}^{-1}$) (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2003; LOBATO, 2011; ZINOTTI, 2012).

Para calcular a parcela de metano removido no aproveitamento energético do biogás (R_{CH_4} teórico), foi utilizada a equação dos gases ideais (Equação 2), considerando-se: $P=1$ atm (pressão ambiente); $V=2.699,4$ m³ (produção volumétrica teórica máxima de CH_4 em 1 dia, Q_{CH_4}); $MM_{CH_4}=16$ g.mol⁻¹ (massa molecular do CH_4); $R=0,08206$ atm.L.mol.K⁻¹ (constante dos gases); $T=21,1$ °C (temperatura operacional do reator biológico).

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot (T + 273) \quad (2)$$

$$MM_{CH_4}$$

Onde:

V: produção volumétrica diária de CH_4 (m³.d⁻¹)

m: produção mássica diária de CH_4 (Kg CH_4 .d⁻¹)

Tabela 6 - Resultado das variáveis calculadas.

Variáveis	Valores obtidos
Fator de emissão (F_E)	0,19 $kgCH_4 / kgDQO_{Remov}^{-1}$
DQO convertida em biomassa (DQO_{Lodo})	1.439,2 $kgDQO_{Lodo} \cdot d^{-1}$
CH_4 removido no aproveitamento energético (R_{CH_4} teórico)	1.789,6 $kgCH_4 \cdot d^{-1}$
CH_4 removido no aproveitamento energético (R_{CH_4} calculado)	946,2 $kgCH_4 \cdot d^{-1}$
Emissão total de CH_4 (E_{CH_4} sem recuperação do biogás)	1.549,5 $kgCH_4 \cdot d^{-1}$
Emissão total de CH_4 (E_{CH_4} com recuperação do biogás)	603,3 $kgCH_4 \cdot d^{-1}$

Os valores são resultado da aplicação das equações indicadas na Tabela 1.
DQO: demanda química de oxigênio.

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

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

T: temperatura operacional do reator (°C)

P: pressão atmosférica (atm)

Ao substituir o volume correspondente a Q_{CH_4} (valor teórico) por $Q_{Real-CH_4}$ (valor real calculado), na Equação 2, verificou-se que a emissão efetivamente evitada de metano pela implantação do sistema de recuperação do biogás na ETE Santa Quitéria seria de 946,2 $kgCH_4 \cdot d^{-1}$ (R_{CH_4} calculado), isso significa cerca de 52,9% menor que o valor teórico.

A diferença entre o valor teórico e o valor real se deve às perdas de metano nas fases líquida e gasosa, bem como à parcela consumida na conversão do sulfato em sulfeto durante o tratamento, as quais não são consideradas no cálculo de R_{CH_4} teórico. Dessa forma, o R_{CH_4} calculado fornece uma resposta mais precisa.

Sendo assim, os resultados obtidos mostram que a recuperação do biogás pode reduzir a emissão total de metano (E_{CH_4}) de 1.549,5 para 603,3 $kgCH_4 \cdot d^{-1}$ na ETE Santa Quitéria (cerca de 220,2 ton CH_4 evitada por ano).

Porém, pela estequiometria da reação de combustão do CH_4 (Equação 3) é possível observar que 16 g $CH_4 \cdot mol^{-1}$ são consumidos, enquanto 44 g $CO_2 \cdot mol^{-1}$ são liberados. Com isso, estima-se que a queima de 942,6 $kgCH_4 \cdot d^{-1}$ (R_{CH_4} real calculado) resulte na formação de 2.602,0 $kgCO_2 \cdot d^{-1}$.



Sabendo-se que o PAG do CH_4 é 21 vezes o valor do CO_2 , tem-se que a massa correspondente à emissão evitada de metano (R_{CH_4} real calculado) seria igual a 19.794,6 $kgCO_{2eq} \cdot d^{-1}$. Subtraindo-se desse valor a massa de CO_2 formada na reação de combustão do CH_4 (Equação 3), tem-se que a redução estimada na emissão de GEEs seria de 17.192,6 $kgCO_{2eq} \cdot d^{-1}$ ou 522,9 ton CO_{2eq} evitada por mês com a recuperação do biogás.

Assim, o aproveitamento do gás metano na ETE Santa Quitéria representa um benefício ambiental efetivo, vindo ao encontro das diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Mudanças do Clima (Lei nº 12.187/2009) para a mitigação de emissões de GEEs decorrentes do processo biológico de decomposição da matéria orgânica presente no esgoto bruto.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

- a produção média de metano disponível para o aproveitamento energético na ETE Santa Quitéria foi estimada em 1.427,2 m³.d⁻¹;

- o potencial de geração de energia elétrica na ETE Santa Quitéria foi calculado em 65.280,3 kWh.mês⁻¹. Esse valor representa cerca de 59% da demanda média de energia elétrica mensal na estação entre os meses de agosto de 2012 e março de 2013.
- a recuperação do biogás nessa estação de tratamento pode reduzir a emissão total de metano (E_{CH_4}) de 1.549,5 para 603,3 kgCH₄.d⁻¹, considerando-se o F_E de 0,19 kgCH₄.kgDQO_{Remov}⁻¹ calculado a partir de dados de monitoramento da ETE Santa Quitéria;
- com a recuperação do biogás estima-se a redução de 17.192,6 kgCO_{2eq}.d⁻¹ ou 522,9 tonCO_{2eq} evitada por mês na emissão de GEEs a partir do sistema de tratamento de esgoto utilizado na estação;
- os autores sugerem ainda um estudo econômico para identificar o investimento necessário para a implantação do sistema de aproveitamento do biogás na geração de energia elétrica e o tempo de retorno desse investimento, considerando despesas (aquisição de tecnologias) e receita (redução do consumo de energia).

REFERÊNCIAS

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (2009) Resolução Normativa n. 390, de 15 de dezembro de 2009. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2009390.pdf>> Acesso em: 24 maio 2014.
- BRASIL. (1995) Lei 9.074, de 07 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9074cons.htm> Acesso em: 20 maio 2014.
- BRASIL. (1996) Lei 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9427cons.htm> Acesso em: 20 maio 2014.
- BRASIL. (2011) Conselho Nacional de Meio Ambiente, Resolução 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>> Acesso em: 20 maio 2014.
- CHERNICHARO, C.A.L. (2007) *Reatores anaeróbios*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. v.5. 380p.
- COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; MARTINS, O.S.; COSTA, D.F.; BASAGLIA, F.; BACIC, A.C.K. (2004) Instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto. In: Encontro de Engenharia no Meio Rural, 5 Anais... 2004. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; MARTINS, O.S.; ABREU, F.C.A. (2006) Conversão da fonte renovável biogás em energia. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 5, Anais... 2006. Brasília: Universidade de Brasília.
- COSTA, D.F. (2006) *Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto*. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- DENG, Y.; XU, J.; LIU, Y.; MANCL, K. (2014) Biogas as a sustainable energy source in China: Regional development strategy application and decision making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 35, p. 294-303.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. (2013a) *Balanço Energético Nacional, Ministério de Minas e Energia*. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf> Acesso em: 24 maio 2014.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. (2013b) *Anuário de estatística de energia elétrica, Ministério de Minas e Energia*. Disponível em <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf> Acesso em: 24 maio 2014.
- FARIA, R.A.P. (2012) *Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto - Estudo de caso*. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.
- FRANÇA JUNIOR, A.T. (2008) *Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.
- GARCILASSO, V.P.; FIGUEIREDO, N.J.V.; COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G. (2008a) Potencial de geração de energia elétrica e iluminação a gás por meio do aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário. In: Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, 7 Anais... 2008a. Fortaleza: Universidade de Fortaleza.
- GARCILASSO, V.P.; FIGUEIREDO, N.J.V.; COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G. (2008b) Biogás e o mercado de créditos de carbono. In: RIO Oil & Gas Expo and Conference, 3 Anais... 2008b. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustível.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2013) *Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Disponível em: <http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2014.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2006) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Published: IGES, Japan. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>>. Acesso em: 08 jun. 2014.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D. (2003) *Wastewater Engineering Treatment and Reuse: Metcalf and Eddy*. 4th ed. New York: McGraw Hill.

JIANG, X.; HAYASHI, J.; SUN, Z.Y.; YANG, L.; TANG, Y.Q.; OSHIBE, H.; OSAKA, N.; KIDA, K. (2013) Improving biogas production from protein-rich distillery wastewater by decreasing ammonia inhibition. *Process Biochemistry*, v. 48, p. 1778-1784.

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

MMA - Ministério do Meio Ambiente. (2010) *Produto 6 - Resumo executivo. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), São Paulo*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf>. Acesso em: 08 maio 2014.

SNIS - Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. (2012) Ministério das Cidades. *Diagnóstico dos serviços de água e esgoto*. 18ª ed. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRerterterTERter=103>>. Acesso em: 24 maio 2014.

VARNERO, M.T.; CARÚ, M. GALLEGUILLOS, K.; ACHONDO, P. (2012) Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información Tecnológica*, v. 23, p. 31-40.

VENKATESCH, G. & ELMI, R.A. (2013) Economic-environmental analysis of handling biogas from sewage sludge digesters in WWTPs (wastewater treatment plants) for energy recovery: Case study of Bekkelaget WWTP in Oslo (Norway). *Energy*, v. 58, p. 220-235.

ZILOTTI, H.A.R. (2012) *Potencial de produção de biogás em uma Estação de tratamento de esgoto de cascavel para a geração de energia elétrica*. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

Errata

No artigo “Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos”, com número de DOI: 10.1590/S1413-41522016141477, publicado no periódico *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21(2):275-282, na página 280:

Onde se lê:

$$P.V = m.R. (T+273) \quad (2)$$

MM_{CH_4}

Leia-se

$$P.V = \frac{m.R. (T+273)}{MM_{CH_4}} \quad (2)$$