



II-001 - ANÁLISE COMPARATIVA DA GERAÇÃO TEÓRICA E REAL DE BIOGÁS DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS COM SISTEMA ANAERÓBIO DO TIPO UASB

Lucas Rachid de Oliveira Lannes⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF). Analista de Pesquisa e Tecnologia do Grupo Águas do Brasil S/A.

Geraldo Andre Thurler Fontoura⁽²⁾

Químico Industrial pelo Instituto de Química da Universidade Federal Fluminense (UFF). Doutorado em Engenharia de Produção na Coppe/UFRJ. Professor adjunto do departamento de Química Analítica do Instituto de Química da UFF.

André Lermontov⁽³⁾

Engenheiro Químico pela Escola de Química da UFRJ. Mestre em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Doutor em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Superintendente de Tecnologia do Grupo Águas do Brasil S/A com mais de 18 anos de experiência em saneamento ambiental, tratamento de água e efluentes.

Rodrigo Alves dos Santos Pereira⁽⁴⁾

Mestre em Processos Químicos e Bioquímicos na Escola de Química da UFRJ. Engenheiro Ambiental pela Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF). Especialista de Pesquisa e Tecnologia do Grupo Águas do Brasil S/A.

Endereço⁽¹⁾: Rua Marquês do Paraná, 110 - Centro - Niterói - RJ - CEP: 24030- 211 - Brasil - Tel: +55 (21) 2729-9200 - e-mail: lucas.lannes@grupoaguasdobrasil.com.br

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a comparação entre o volume teórico de biogás e o volume real de biogás, mensurado por um equipamento, na estação de tratamento de esgoto de Itaipu do município de Niterói. Para isso, foram utilizados os dados de monitoramento da estação (vazão média diária, DQO afluente, DQO efluente, temperatura do reator anaeróbio e medições da vazão de biogás do equipamento instalado), fornecidos pela concessionária Águas de Niterói. O estudo iniciou-se com a determinação do volume teórico de biogás, onde foi realizado o balanço de massa no reator anaeróbio do tipo UASB a fim de determinar a quantidade transformada em massa de metano no reator. Em seguida, foi calculada a produção volumétrica teórica de metano, aplicando duas metodologias e, posteriormente, foi obtida a produção volumétrica de biogás. Foram desenvolvidas também relações unitárias por meio do volume de biogás produzido por carga orgânica removida, por DQO afluente e por vazão de esgoto, tanto para o volume teórico e o volume real de biogás. As relações unitárias encontradas pela produção volumétrica teórica foram de 0,417 m³ de biogás / kg DQO removida, 0,272 m³ de biogás / kg DQO afluente e 0,119 m³ de biogás / m³ esgoto, enquanto a produção real obtida foi de 0,234 m³ de biogás / kg DQO removida, 0,152 m³ de biogás / kg DQO afluente e 0,067 m³ de biogás / m³ esgoto.

PALAVRAS-CHAVE: Produção volumétrica, Reator anaeróbio, Relação unitária.

INTRODUÇÃO

De acordo com dados da Agência Nacional de Águas (2017), 45,4% da população brasileira não possui tratamento de esgotos sendo que 18,8% dos esgotos chegam a ser coletados, porém não são tratados, resultando em lançamentos nos corpos hídricos pelas prestadoras de serviço e 26,6% não são coletados e nem tratados, resultando em lançamentos nas redes de águas pluviais, disposição direta no solo ou nos corpos d'água. O restante da população urbana brasileira, equivalente a 54,6%, possui atendimento adequado no tratamento dos efluentes gerados. As redes coletoras de esgoto alcançam 61,4% da população urbana, porém apenas 42,6% são tratados por uma estação de tratamento de esgoto (ETE). Os outros 12% restantes que possuem atendimento no tratamento de efluentes, utilizam-se de solução individual por meio de fossas sépticas, pois as redes coletoras não alcançam.



A situação do setor de saneamento ainda necessita de avanços tecnológicos em tratamento de esgotos sanitários e, principalmente, da expansão do serviço em todo o território. A necessidade de ampliação dos índices de cobertura do tratamento de esgoto tem como função evitar danos à saúde pública por meio da transmissão de doenças e ao meio ambiente, afetando os recursos hídricos, a fauna e a flora ao poluir fontes, águas subterrâneas e mares. Todos esses danos são causados pelo efluente, um termo usado para a água eliminada após a utilização humana, podendo ser doméstico, pluvial ou industrial (VAN HAANDEL, 1994).

As tecnologias atuais aplicadas no tratamento de efluentes domésticos são variadas, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Elas podem ser divididas em dois grandes grupos: dos tratamentos aeróbios e dos anaeróbios. Sendo que, dependendo do efluente, ambas podem funcionar de forma complementar. O processo mais comum para o tratamento de efluentes domésticos são os aeróbios, porém a aplicação dos processos anaeróbios tem aumentando devido à série de vantagens desse processo. A principal vantagem do tratamento anaeróbio tipo UASB é a eficiência na remoção da matéria orgânica, a partir da digestão anaeróbia, sem necessidade de aeração, resultando em economia de custo com energia elétrica. No entanto, outro lado positivo desse processo é a produção de biogás que pode ser utilizado como fonte de energia na própria estação de tratamento de esgoto (METCALF & EDDY, 2003).

Segundo Van Haandel (1994), o biogás é uma mistura de gases gerados durante a degradação da matéria orgânica no processo anaeróbio. Devido ao seu alto potencial energético, sua utilização como fonte de energia renovável para geração de energia elétrica vem sendo realidade no exterior, podendo ser transformado para outros fins além da energia elétrica. No Brasil, o aproveitamento de biogás em estações de tratamento de esgoto ainda é relativamente pequeno, se levarmos em consideração o potencial que o Brasil apresenta em relação à produção de biogás e na utilização energética. Este panorama das estações de tratamento de esgoto com baixo aproveitamento de biogás no Brasil é resultado do alto custo de investimentos para compra de equipamentos, na maioria dos casos importados, somado às dúvidas do retorno financeiro e da viabilidade econômica (PROBIOGÁS, 2015).

Nesse contexto, apresenta-se um estudo para analisar o potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento no município de Niterói, estado do Rio de Janeiro. Essa análise foi realizada por meio da comparação entre o potencial volumétrico teórico e a produção efetiva real de biogás gerado a partir de reatores anaeróbios do tipo UASB. Todos os dados utilizados no estudo são de monitoramento da estação de tratamento de esgoto Itaipu, disponibilizados pela concessionária Águas de Niterói, referentes ao primeiro semestre de 2016.

OBJETIVOS

Neste trabalho, visa-se aplicar metodologias para avaliar o potencial de geração de biogás por uma estação de tratamento de esgoto, tendo como objetivos específicos identificar as etapas necessárias para avaliação do potencial de geração de biogás, realizar o cálculo da geração do biogás pela metodologia de balanço de massa escolhida e comparar com o valor real obtido na operação de uma unidade e elaborar relações unitárias de produção de biogás na estação de tratamento de esgoto estudada.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

PRODUÇÃO TEÓRICA DO BIOGÁS

Com intuito de acompanhar o desempenho operacional do reator anaeróbio e analisar as formas de transformação da matéria orgânica no processo, o balanço de massa da DQO é uma importante ferramenta. Por não existir uma equação exata, diferentes autores avaliam a equação com termos diferentes.

Segundo Lannes (2017), por meio de uma análise entre metodologias, o melhor balanço de massa a ser realizado durante o cotidiano de uma estação de tratamento de esgoto é o que utiliza os principais parâmetros operacionais que são analisados rotineiramente em uma estação de tratamento de esgoto, gerando baixo custo analítico. Por exemplo, a metodologia de Ramos (2008), que para a realização do balanço de massa em termos de DQO nos reatores UASB, são consideradas as análises de DQO do afluente e efluente dos reatores anaeróbios, além da carga de material orgânico na produção do lodo no sistema e da carga convertida em biogás produzido, conforme apresentado na seguinte equação.

$$DQO_{\text{afl}} = DQO_{\text{CH}_4 \text{ biogás}} + DQO_{\text{lodo ret}} + DQO_{\text{efl sol}} \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

DQO_{afl} = carga diária de material orgânico afluyente

$DQO_{\text{CH}_4 \text{ biogás}}$ = carga diária de material orgânico convertida em metano e presente no biogás

$DQO_{\text{lodo ret}}$ = carga diária de material orgânico convertida em lodo retido no sistema

$DQO_{\text{efl sol}} = DQO_{\text{efl sol}}$ = carga diária de material orgânico solubilizada no efluente

Com base na equação do balanço de massa fornecida por Ramos (2008), equação 1, é possível definir a quantidade de massa de material orgânico convertida em metano através da equação 2.

$$DQO_{\text{CH}_4 \text{ biogás}} = DQO_{\text{afl}} - DQO_{\text{lodo ret}} - DQO_{\text{efl sol}} \quad \text{equação (2)}$$

Onde:

$DQO_{\text{CH}_4 \text{ biogás}}$ = carga diária de material orgânico convertida em metano e presente no biogás

DQO_{afl} = carga diária de material orgânico afluyente

$DQO_{\text{lodo ret}}$ = carga diária de material orgânico convertida em lodo retido no sistema

$DQO_{\text{efl sol}}$ = carga diária de material orgânico solubilizada no efluente

O parâmetro $DQO_{\text{lodo ret}}$ existente na equação 2 é preciso ser calculado, pois é um parâmetro difícil de ser medido em comparação com a DQO afluyente e DQO efluente. Portanto, de acordo com Chernicharo (2007), o cálculo da carga de material orgânico convertida em lodo é obtido conforme a equação 3.

$$DQO_{\text{lodo ret}} = Y_{\text{obs}} \times Q \times DQO_{\text{afl}} \quad \text{equação (3)}$$

Onde:

$DQO_{\text{lodo ret}}$ = carga diária de material orgânico convertida em lodo retido no sistema (kg/d)

Y_{obs} = coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (0,11 a 0,23 kg DQO_{lodo} / kg DQO_{api})

DQO_{afl} = concentração diária de material orgânico afluyente (kg/m³)

Q = vazão de esgoto afluyente (m³/d)

Todo afluyente a ser tratado em reatores anaeróbios são transformados em três principais parcelas, sendo uma parcela transformada em lodo, outra em biogás e por fim, o produto final, que é o efluente tratado. A diferença entre as metodologias são a concepção que cada autor tem sobre o processo da digestão anaeróbia durante a fase do tratamento. Logo, a metodologia citada anteriormente possui uma vantagem por ser um método rápido de ser feito no dia a dia da operação de uma estação. Isso se deve pelo fato de possuir apenas os três principais parâmetros de transformação durante o processo dos reatores anaeróbios, excluindo alguns parâmetros como o material orgânico convertido em metano e perdido dissolvido no efluente ou com o gás residual e a massa de material orgânico convertido em metano e perdida dissolvida no efluente que são aplicados em outras metodologias.

Segundo Metcalf & Eddy (2003), a partir da estimativa de degradação de DQO no reator é possível avaliar a produção volumétrica de metano. A remoção de DQO no reator anaeróbio está relacionada com a produção de metano e, por estequiometria, é descoberto o equivalente a DQO correspondente a um mol de metano. A demanda química de oxigênio de metano é a quantidade de oxigênio necessário para oxidar o metano para dióxido de carbono e água, de acordo com a equação 4.



Por meio da estequiometria apresentada na equação acima, um mol de metano requer 2 moles de oxigênio para sua completa oxidação a gás carbônico e água, logo a DQO correspondente a um mol de metano equivale a

64g de O_2 / mol CH_4 ($2 \times 32g$ de O_2 / mol = 64g de O_2 / mol CH_4). Utilizando a lei universal dos gases, é possível mostrar que o volume de gás ocupado por mol de gás à temperatura padrão ($0^\circ C$ e 1 atm) é igual a 22,414 litros. Em seguida, a razão entre o volume de gás ocupado por 1 mol e a DQO correspondente a um mol de metano, resulta no metano equivalente da DQO convertida sob condições anaeróbias, no valor de 0,35 litros de metano para cada grama de DQO degradada ($22,414 / 64 = 0,35$ L CH_4 / g DQO). Logo, a expressão que determina o cálculo da produção teórica do metano, segundo Metcalf & Eddy (2003), é apresentada pela equação 5.

$$V_{CH_4} = 0,35 \left(\frac{L CH_4}{g DQO} \right) \times DQO_{CH_4} \left(\frac{kg DQO CH_4}{d} \right) \times \left(\frac{273+T}{273} \right) (^{\circ}C) \quad \text{equação (5)}$$

Onde:

V_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m^3/d)

DQO_{CH_4} = carga de DQO removida no reator e convertida em metano (kg / d)

T = temperatura operacional do reator ($^{\circ}C$)

Outra forma de se avaliar a produção teórica de metano por grama de DQO removida do efluente, de acordo com Chernicharo (2007), é utilizando a expressão geral apresentada a seguir.

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(T)} \quad \text{equação (6)}$$

Onde:

V_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m^3/d)

DQO_{CH_4} = carga de DQO removida no reator e convertida em metano (g DQO)

$K(T)$ = fator de correlação para a temperatura operacional do reator (kg DQO/ m^3)

O fator de correlação $K(T)$ é dado pela equação 7.

$$K(T) = \frac{P \times K_{DQO}}{R \times (273+T)} \quad \text{equação (7)}$$

Onde:

P = pressão atmosférica (1 atm)

K_{DQO} = DQO correspondente a um mol de CH_4 (64 gDQO/mol)

R = constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.K)

T = temperatura operacional do reator ($^{\circ}C$)

Obtida a produção volumétrica teórica de metano, pode-se estimar a produção de biogás no sistema, a partir do teor esperado de metano no biogás, conforme equação 8. Os teores de metano no biogás gerado pela degradação biológica de efluentes sanitários são da ordem de 70% a 80% (CHERNICHARO, 2007).

$$V_{\text{biogás}} = \frac{V_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad \text{equação (8)}$$

Onde:

$V_{\text{biogás}}$ = produção volumétrica de biogás (m^3/d)

V_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m^3/d)

C_{CH_4} = concentração de metano no biogás (%)

MATERIAIS E MÉTODOS

ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi em uma estação de tratamento de esgoto (ETE) no município de Niterói, visando comparar a geração de biogás com uma ferramenta teórica, por meio de uma metodologia de balanço de massa, com uma ferramenta real: um equipamento de medição de volume de biogás gerado na estação de tratamento de esgoto. As informações e dados dos processos de tratamento de efluentes da ETE foram realizados por meio de visitas técnicas.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A ETE Itaipu sob concessão da concessionária Águas de Niterói, está localizada no bairro de Itaipu, e recebe o esgoto sanitário bruto proveniente dos sistemas elevatórios. A ETE Itaipu foi projetada para operar com vazão de pico (capacidade máxima de tratamento) de 294 L/s, sendo que atualmente opera com vazão média de 164 L/s, atendendo os bairros de Itaipu, Itacoatiara e Engenho do Mato e beneficiando uma população aproximada de 69.000 habitantes, na Tabela 1 são apresentadas suas principais características.

Tabela 1 - Características da estação

ETE	População atendida (hab.)	Vazão de operação atual (L/s)	Vazão de operação durante estudo (L/s)	Tipo de Tratamento
Itaipu	69.000	164	89	Terciário

A estação de tratamento de esgoto Itaipu possui nível terciário (coagulação/flotação), além dos processos físico-químicos e biológicos. A unidade consegue uma remoção da carga orgânica de 90% de DBO, além de ter capacidade de remover os compostos à base de nitrogênio e fósforo, atendendo às exigências legais quanto ao lançamento do efluente tratado na Lagoa de Itaipu.

Conforme o fluxograma de processo da estação da Figura 1, o esgoto bruto, proveniente dos sistemas elevatórios, segue de modo contínuo ao tratamento preliminar integrado da ETE Itaipu, que promove a remoção dos materiais grosseiros, sólidos sedimentáveis e óleos e graxas não dissolvidos por meio do processo unitário de gradeamento, desarenação e remoção de gordura, respectivamente. Esses processos unitários são integrados em um único equipamento que foi dimensionado para funcionar em paralelo com capacidade máxima de tratamento de 294 L/s. O efluente segue, então, para o sistema de medição de vazão e pH. Esse sistema é composto, respectivamente, por uma *calha parshall* acoplada com um medidor de nível ultrassônico e um pHmetro.

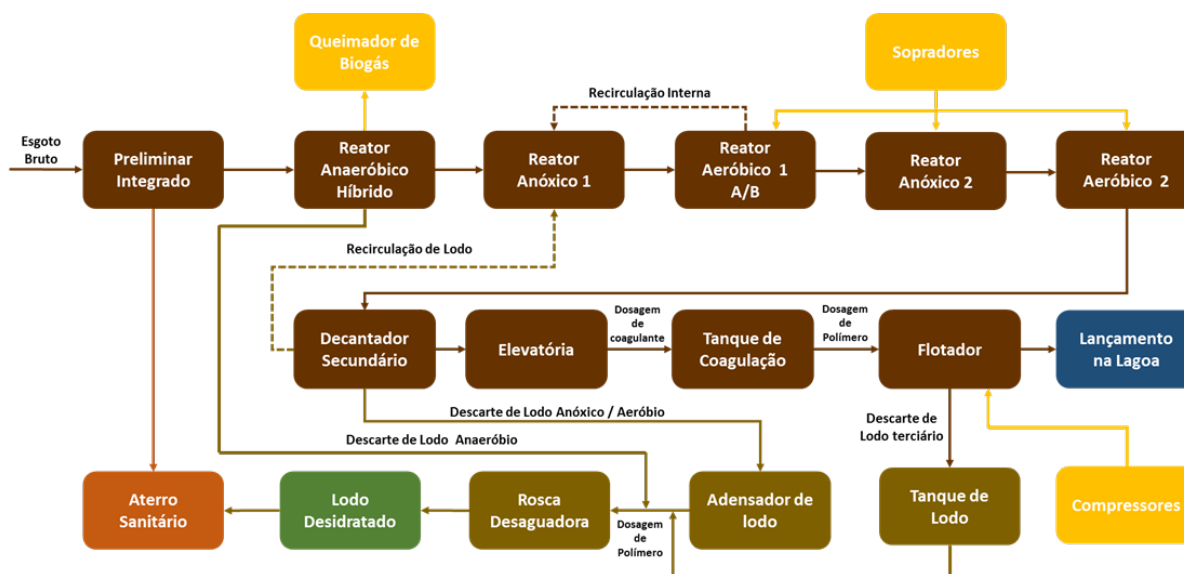


Figura 1 – Fluxograma da ETE Itaipu

Posteriormente, o esgoto sanitário seguirá para o tratamento biológico composto por:

- Reator anaeróbio (UASB): responsável pela remoção inicial da carga orgânica, retenção de sólidos suspensos e produção de biogás;
- Reatores anóxicos com material suporte: responsável pela conversão do nitrogênio na forma de nitrato em nitrogênio gasoso;
- Reatores aeróbios com material suporte: responsáveis pela remoção da matéria orgânica remanescente das etapas anteriores e pela remoção do nitrogênio amoniacal do efluente.
- Decantador secundário de alta taxa: responsável pela separação do lodo biológico do efluente tratado.

Depois de passar pelo tratamento biológico, a próxima etapa do efluente tratado é o tratamento terciário composto por um tanque de coagulação e um flotor por ar dissolvido, responsáveis pela remoção do fósforo e sólidos suspensos remanescentes do tratamento biológico. Para concluir o processo, a unidade possui um sistema de desinfecção, na qual remove os microrganismos patogênicos, para que o efluente seja lançado no corpo receptor conforme legislação.

Sobre os rejeitos gerados na estação, os sólidos grosseiros, areia e óleos e graxas, oriundos do tratamento preliminar, são encaminhados separadamente para caçambas e dispostos, em aterro sanitário. Todo lodo gerado da ETE Itaipu, proveniente dos tratamentos biológico e terciário, são encaminhados para o sistema de desidratação de lodo existente na estação e posteriormente destinados em aterro sanitário.

Em relação ao biogás gerado na ETE Itaipu, sua coleta dos separadores trifásicos instalados no topo do reator UASB, conforme Figura 2, direcionam por meio da tubulação de coleta de gás, Figura 3, o gás para o selo hídrico, Figura 4, que é responsável pelo controle e manutenção da pressão interna do separador trifásico.



Figura 2 - Coletor de biogás



Figura 3 - Tubulação de coleta de gás



Figura 4 - Selo Hídrico da ETE Itaipu

Em seguida, está instalado em linha o medidor de vazão de biogás da ETE Itaipu, apresentado na Figura 5, para quantificar a quantidade de biogás gerado na unidade. Posteriormente, o biogás é enviado ao queimador de biogás, onde completa sua oxidação sendo lançado na atmosfera conforme Figura 6.



Figura 5 - Medidor de vazão de biogás



Figura 6 - Queimador de biogás

COLETA DE DADOS

A análise do potencial de produção teórico de biogás foi baseada nos dados e informações de monitoramento da estação. Foram utilizados dados reais de monitoramento da concessionária Águas de Niterói, que forneceu os dados de vazão média diária, de DQO da entrada da estação e na saída do reator UASB, da temperatura no reator anaeróbico e do medidor de vazão de biogás (Figura 5) instalado na ETE Itaipu, referentes ao primeiro semestre de 2016, totalizando 86 dias. O período de dados fornecidos é igual para cada dado, coletados pela operação da ETE Itaipu nos dias úteis dos meses de janeiro a junho de 2016.

TRATAMENTO DOS DADOS

Para análise do potencial de produção de biogás foram utilizados o *software* Microsoft Excel e as metodologias apresentadas no trabalho (balanço de massa, fatores empíricos para a estimativa de produção de metano em reatores anaeróbicos e fórmulas de cálculo do potencial teórico de biogás), com base nos dados coletados. Com isso, foi possível elaborar tabelas e gráficos que expressam os resultados em relação aos diferentes métodos de calcular a produção de biogás.

Para o tratamento dos dados foram analisados possíveis valores da série de dados que aparentemente apresentavam erros. Por exemplo, dados de DQO afluente inferiores ao de DQO efluente e dados de DQO afluente que não tinham dados do efluente correspondentes.

AValiação DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

Todo o processo de avaliação da produção de geração de biogás na ETE Itaipu foi desenvolvido com base nos dados fornecidos pela concessionária responsável, não necessitando de visitas com intuito da coleta de dados. Para a análise entre o potencial teórico e a produção real de biogás foram desenvolvidas três etapas, sendo a primeira, o cálculo do balanço de massa no reator anaeróbico tipo UASB para determinar a quantidade de massa de metano gerado no reator.

A segunda foi a determinação da produção teórica volumétrica de metano e, conseqüentemente, a produção teórica volumétrica de biogás. Nessa etapa, para o cálculo da produção volumétrica de metano, foram utilizadas duas metodologias de comparação, uma de Metcalf & Eddy (2003) e a outra de Chernicharo (2007)

conforme equações 5 e 6 respectivamente. Para a produção teórica de biogás no sistema, foi adotada uma concentração de metano de 70% no biogás gerado, baseado nas indicações de Chernicharo (2007) que expressa uma concentração que pode variar entre 70% a 80% em efluentes sanitários.

Na terceira etapa foi realizada a comparação entre a produção teórica de biogás em cada metodologia utilizada com a produção real de biogás, fornecida pela concessionária Águas de Niterói por meio do medidor de vazão de biogás instalado na estação de tratamento de esgoto Itaipu. Por fim, foram realizadas relações unitárias a partir do volume de biogás teórico e real produzido por carga orgânica removida, por DQO afluente e por vazão de esgoto, que foram apresentados na Tabela 9.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

BALANÇO DE MASSA PARA CÁLCULO DA MASSA CONVERTIDA EM METANO

Para determinar o volume teórico de metano é preciso realizar o balanço de massa. A partir dos dados fornecidos de DQO afluente e DQO efluente na saída do reator anaeróbio é possível determinar a quantidade de DQO que é convertida em gás metano ($DQO_{CH_4 \text{ biogás}}$). Com base na equação do balanço de massa fornecida por Ramos (2008), equação 1, a quantidade de massa de material orgânico convertida em metano é calculada por meio da equação 2.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos valores médios, máximos e mínimos fornecidos pela Águas de Niterói, que servirão de dados de entrada para todas as etapas para se obter a produção volumétrica teórica de biogás e sua comparação com a produção real.

Tabela 2 - Valores de entrada para cálculos

	Vazão média diária afluente	DQO afluente	DQO efluente	Vazão biogás real	Temperatura no anaeróbio
	(L/s)	(mg/L)	(mg/L)	(N.m ³ /dia)	(°C)
Média	88,74	438,65	153,26	446,00	28,91
Máxima	94	1084	299	928	31
Mínima	85	73	36	103	26

Aplicando os dados fornecidos pela concessionária e adotando o coeficiente de produção de sólidos no sistema igual a 0,16 kg DQO_{lodo} / kg DQO_{apl} nas equações 2 e 3, estimou-se a massa de DQO convertida em lodo e consequentemente, a DQO convertida em metano. Esses cálculos foram realizados para cada dia com dado fornecido e, após calcular os parâmetros de DQO do lodo e DQO de metano para cada dia, foi feita a média entre os dados diários calculados. A Tabela 3 possibilita uma visão global dos resultados calculados médio, máximo, mínimo e de um dia aleatório da $DQO_{CH_4 \text{ biogás}}$ e $DQO_{\text{lodo ret.}}$.

Tabela 3 - Valores calculados médio, mínimo, máximo e diário da DQO lodo e DQO metano.

	DQO afluente	DQO efluente	Conversão em efluente	DQO lodo	Conversão em lodo	DQO metano	Conversão em metano
	(mg/L)	(mg/L)	%	(mg/L)	%	(mg/L)	%
Média	438,65	153,26	35%	70,18	16%	215,21	49%
Máximo	1084,00	299	28%	173,44	16%	696,56	64%
Mínimo	73,00	36,00	49%	11,68	16%	22,00	30%
Dia aleatório	649,00	131	20%	103,84	16%	414,16	64%

Comparando os resultados obtidos com as porcentagens de conversão biológica no sistema anaeróbio, o UASB da ETE Itaipu, teve apenas 25 dos 86 dados com padrões similares a verificação de Chernicharo

(2007), excluindo a análise do padrão de conversão de lodo. Isso porque a DQO de lodo apresentou todos os valores com uma porcentagem de 16%, impossibilitando alcançar a margem estabelecida de 5 a 15%, pois o cálculo realizado leva em conta o produto entre coeficiente de produção de sólidos no sistema igual a 0,16 kg DQO_{lodo} / kg DQO_{apl}, a DQO afluente e a vazão afluente. Portanto, a conversão do lodo utilizando essa metodologia sempre irá variar entre 11 a 21%, devido à faixa do coeficiente de produção de sólidos no sistema. Em relação à média entre os dados diários calculados, o resultado foi bem próximo do padrão apresentado em um reator anaeróbico, conforme Chernicharo (2007). A divergência foi de apenas 1% para a conversão em metano e a superação de 5% na transformação em efluente. Portanto, a eficiência média de remoção da carga orgânica no reator foi de 65%.

Com relação às eficiências de remoção da DQO, o reator anaeróbico da ETE Itaipu apresentou média de 65%. De acordo com Chernicharo (2007), os valores de eficiência de remoção de carga orgânica em reatores tipo UASB correspondem a uma faixa média de 40% a 80%. Analisando concomitantemente os dados de eficiência de remoção, percebeu-se que no período avaliado a eficiência é pouco correlacionada com as alterações da carga orgânica e da temperatura. Por exemplo, os dias 13/01 e 09/05 apresentaram eficiências de remoção da carga orgânica de 73%; porém, a temperatura entre os dias variou apenas 0,6°C e a quantidade de concentração de DQO afluente foi de 499 mg/L e 1084 mg/L respectivamente.

QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME TEÓRICO DE BIOGÁS

A partir da massa de material orgânico convertida em metano e presente no biogás calculado pelo balanço de massa, foi quantificado, primeiramente, o volume teórico de metano por meio de duas metodologias e, depois, calculado o volume de biogás. Utilizando a equação 5, de Metcalf & Eddy (2003), foi calculado o volume teórico diário de metano utilizando as temperaturas diárias fornecidas pela concessionária responsável pela estação. A média de metano produzido por essa metodologia foi de 639,83 m³ por dia.

Pela outra metodologia, de acordo com Chernicharo (2007), a conversão da massa de metano em kg DQO_{CH₄} / d em produção volumétrica de metano (m³/d) foi obtida pelas equações 6 e 7. Para isso, foram usadas três constantes físicas e os dados de temperatura fornecidos pela Águas de Niterói. A temperatura foi um parâmetro significativo nessa equação, pois ela que influencia o valor do fator de correção. Como a temperatura não variou de modo considerável no período estudado, o resultado do fator de correção diário da temperatura operacional do reator foi praticamente o mesmo, variando entre 2,57 e 2,61 kg/m³. Os resultados do volume teórico de metano produzido, pela metodologia de Chernicharo (2007), foram calculados pela razão entre a carga de DQO afluente convertida em metano e o fator de correção da temperatura no reator UASB. De acordo com os cálculos, o valor médio de metano produzido por essa metodologia foi de 639,50 m³ por dia. Na Tabela 4, são apresentados os valores médios de volume de metano em cada metodologia aplicada.

Tabela 4 – Valores médios da produção de metano

	Metcalf & Eddy (2003)	Chernicharo (2007)
	Volume de metano	Volume de metano
	(m³/d)	(m³/d)
Médio	639,83	639,50
Máximo	2108,18	2107,08
Mínimo	64,85	64,81

Foi observado que, em relação ao valor médio, a diferença entre as metodologias aplicadas foi de apenas 0,33 m³/d, o que não representou uma diferença estatisticamente significativa. Portanto, os cálculos seguintes foram realizados com os resultados da metodologia de Chernicharo (2007), por apresentar um cálculo mais detalhado para a produção de metano. Logo, pode-se afirmar que a escolha de uma das metodologias não influencia nos resultados finais do trabalho. No cálculo de produção de volume de biogás, equação 8, por meio da metodologia de Chernicharo (2007), foram utilizados os resultados diários de produção de metano. Nela foi adotado um teor de 70% de metano no biogás gerado pela degradação biológica dos efluentes sanitários. Com isso, foram gerados os resultados médios apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores teórico da produção de biogás

Chernicharo (2007)	
Volume de biogás	
	(m ³ /d)
Médio	913,57
Máximo	3010,12
Mínimo	92,59

VOLUME REAL DE BIOGÁS

Para calcular o volume real de biogás produzido pelo reator anaeróbio, foi utilizado um medidor de fluxo de massa térmica para quantificar a vazão de biogás, conforme Figura 7, modelo 62-9/9500P fabricado pela *Thermal Instrument Company*. O mecanismo de medida do equipamento é feito pelo aquecimento de um ou mais pontos na parede condutora do fluido a uma temperatura e medindo a potência necessária para manter essa temperatura. Existe uma relação direta entre a taxa do fluxo de massa de fluido e a potência operacional do aquecedor. O aparelho fornece o resultado em Nm³/h (normal metro cúbico por hora) e seu acumulado ao longo do dia em Nm³.



Figura 7 - Equipamento para quantificar a vazão de biogás no reator

Os dados fornecidos pela concessionária Águas de Niterói foram em Nm³/d, nos mesmos períodos dos valores de entrada para o cálculo da produção teórica de biogás. Com o conhecimento do volume de biogás gerado no reator UASB, foi possível validar os dados obtidos pela conversão teórica e, com isso, aproximar o estudo da realidade do processo biológico.

Para comparar o volume real com o volume teórico, houve a necessidade de converter o dado fornecido pela concessionária. A conversão de Nm³/d para m³/d foi essencial para análise final do estudo, pois os resultados da produção teórica foram achados em m³/d. Segundo HIRO (2015), existem várias interpretações dadas por essa unidade e a mais utilizada é definida pela Lei dos Gases Perfeitos, referente à condição normal de temperatura e pressão (CNTP). Os valores utilizados na conversão foram baseados nas condições locais onde o equipamento está instalado. O valor da pressão atmosférica foi de 1,033 kg/cm² abs, equivalente à altitude ao nível do mar; já a temperatura do ar adotada foi de 30°C e a umidade relativa de 78%. Por fim, a pressão parcial do valor de água adotada foi de 0,04324 kg/cm² abs, com base na temperatura do ar definida anteriormente. O resultado da conversão dos dados fornecidos em m³/d, pode ser analisado na Tabela 6.

Tabela 6- Valores da conversão de Nm³/d para m³/d do volume de biogás

	Vazão real de biogás	
	(Nm ³ /d)	(m ³ /d)
Média	446,00	511,56
Máxima	928,00	1064,42
Mínima	103,00	118,14

COMPARAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Considerando toda a série de dados calculados, a análise entre a produção teórica de biogás e a produção real de biogás na ETE Itaipu foi realizada. Conforme apresentado na Tabela 7, a média do volume teórico foi superior em aproximadamente 402 m³/d em comparação com o volume real medido no equipamento.

Tabela 7 - Comparação entre a produção teórica e real de biogás

	Produção Real	Produção Teórica	Diferença entre produções
	m ³ /d	m ³ /d	m ³ /d
Média	511,56	913,57	402,00
Máximo	1064,42	3010,12	2255,39
Mínimo	118,14	92,59	-330,36

Os fatores que podem ter levado a esta diferença do volume real com o volume teórico podem ser considerados: possíveis vazamentos de biogás nas junções de tubulações; a perda de biogás nas paredes defletoras das câmaras; a perda de parte do metano solubilizado no efluente; a falta de calibração no equipamento de medição e possíveis erros nas análises dos dados enviados pela concessionária. Esses fatores são influenciados por aspectos de projeto, operacionais e/ou do clima de região. Na Figura 8, é demonstrado o comportamento da produção volumétrica teórica e real de biogás em relação com a DQO afluente. A produção de biogás pode ser atribuída a diversos fatores como, as cargas orgânicas volumétricas de afluente, a eficiência de remoção e o estado das estações de tratamento de esgoto, que pode ocasionar vazamentos de biogás para atmosfera.

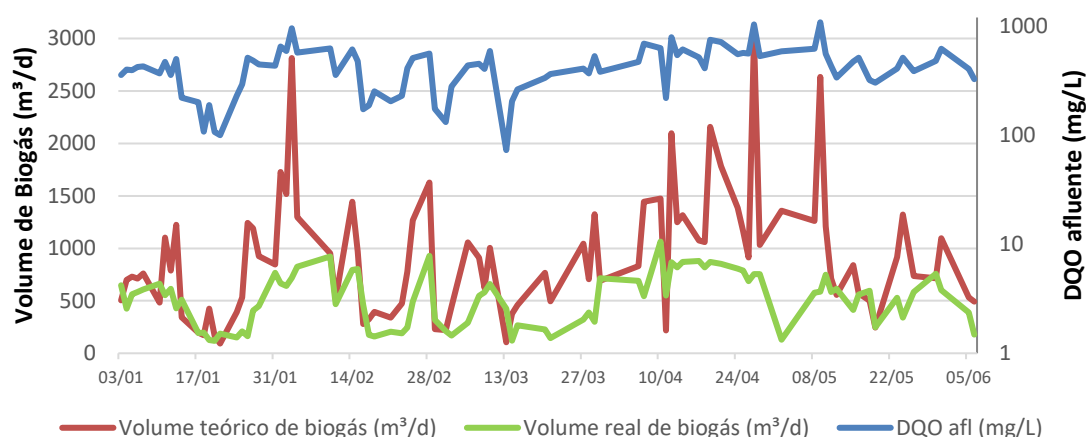


Figura 8 - Comportamento diário do volume de biogás em relação com a DQO afluente

No caso da ETE Itaipu, observa-se na Figura 8 que o volume teórico de biogás está relacionado positivamente à concentração de DQO afluente, isto é, quanto maior a DQO aplicada no UASB, maior é a produção do volume de biogás. Já analisando o volume real do biogás, a correlação com a DQO aplicada aos reatores anaeróbios não possui uma relação similar, conforme o volume teórico de biogás. Isso acontece devido à

existência de perdas na tubulação, perda de metano solubilizado no efluente, falta de calibração do equipamento ou influencia do clima da região.

RELAÇÕES UNITÁRIAS DE PRODUÇÃO DE METANO E BIOGÁS

A partir dos dados calculados e fornecidos, foram calculadas relações unitárias associadas à produção de metano e biogás por carga orgânica removida ($\text{m}^3/\text{kg DQO}_{\text{removida}}$), por $\text{DQO}_{\text{afluente}}$ ($\text{m}^3/\text{kg DQO}_{\text{afluente}}$) e por vazão de esgoto tratado ($\text{m}^3/\text{m}^3_{\text{esgoto}}$), nos reatores UASB tratando esgoto sanitário. Os resultados foram comparados com as relações existentes dos autores Leite (1997), Metcalf e Eddy (2003) e Lobato (2011).

De acordo com Leite (1997), o tratamento anaeróbio com carga orgânica de resíduos sólidos urbanos com lodo de esgoto sanitário, apresentou taxa média de produção de $0,25 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg DQO}_{\text{aplicada}}$, que convertida em $\text{m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg DQO}_{\text{aplicada}}$, apresenta um valor de $0,287 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg DQO}_{\text{aplicada}}$. Segundo Metcalf e Eddy (2003), para a digestão anaeróbia de lodo aeróbio estima-se uma produção de metano de $0,40 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg DQO}_{\text{removida}}$.

Os resultados obtidos apresentados na Tabela 8, foram calculados com as médias dos dados de volume teórico de metano (m^3/d), da vazão média diária afluente (m^3/d), de $\text{DQO}_{\text{afluente}}$ (kg/d) e de $\text{DQO}_{\text{removido}}$ (kg/d). A $\text{DQO}_{\text{removida}}$ foi calculada pela diferença entre a carga orgânica afluente e efluente.

Tabela 8 - Relações unitárias de produção de metano na ETE Itaipu

Relações Unitárias	Unidade	Produção teórica de metano – Chernicharo (2007)
Volume unitário de metano produzido por carga orgânica removida	$(\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}_{\text{removida}})$	0,292
Volume unitário de metano produzido por $\text{DQO}_{\text{afluente}}$	$(\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}_{\text{afluente}})$	0,190
Volume unitário de metano produzido por vazão de esgoto	$(\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3_{\text{esgoto}})$	0,083

Por meio dos resultados obtidos da ETE Itaipu observa-se que os valores das relações unitárias calculados pelo volume teórico de metano apresentaram uma diferença de $0,108 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg DQO}_{\text{removida}}$ do volume unitário de metano produzido por carga orgânica removida, em comparação com a taxa média de produção de metano do Metcalf e Eddy (2003), cujo valor é de $0,40 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg DQO}_{\text{removida}}$.

Em relação ao volume unitário de biogás por $\text{DQO}_{\text{afluente}}$, a comparação com a metodologia de Leite (1997) apresentou um valor maior de apenas $0,005 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg DQO}_{\text{afluente}}$. Se tratando da relação com a vazão de esgoto, a comparação dos resultados obtidos com a faixa estimada por Lobato (2011) de $0,035$ a $0,103 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg m}^3_{\text{esgoto}}$ estão coerentes.

Para que possam obter estimativas mais precisas de produção de biogás em reatores anaeróbios do tipo UASB, destaca-se a importância de se calcular a relação unitária de produção de metano e de biogás por carga orgânica removida (PROBIOGÁS, 2015) (Tabela 9).

Tabela 9 - Relações unitárias de produção de biogás na ETE Itaipu

Relações Unitárias	Unidade	Produção teórica de biogás	Produção real de biogás
Volume unitário de biogás produzido por carga orgânica removida	(m ³ biogás/kg DQO _{removida})	0,417	0,234
Volume unitário de biogás produzido por DQO afluente	(m ³ biogás/kg DQO _{afluente})	0,272	0,152
Volume unitário de biogás produzido por vazão de esgoto	(m ³ biogás/m ³ esgoto)	0,119	0,067

Ao calcular as relações unitárias de produção de biogás na ETE, foi possível comparar os volumes de biogás teórico e real. As relações unitárias da produção real de biogás apresentam valores que, em geral, são metade das estimativas teóricas. Porém, os resultados das relações unitárias reais ficaram próximos e de acordo com a faixa estimada por Lobato (2011) de 0,22 a 0,27 Nm³ biogás / kg DQO_{removida} e 0,06 a 0,17 Nm³ biogás / m³_{esgoto}.

Essas faixas consideram perdas de metano e redução de sulfato. Pode-se concluir que o volume teórico faz parte de um cenário otimista, onde não existem perdas e reduções, por isso, os resultados das relações unitárias de produção teórica não se encontram na faixa estipulada por Lobato (2011).

CONCLUSÕES

Observou-se que ambas as metodologias de produção volumétrica teórica de metano tiveram resultados semelhantes, com uma diferença entre as médias de apenas 0,33 m³ de metano. Nesse estudo foi utilizado um balanço de massa que seria de fácil execução para a equipe operacional de uma estação de tratamento de esgoto, possuindo apenas parâmetros de simples mensuração. Portanto, a utilização de balanços de massa com mais parâmetros como massa de material orgânico convertida em metano e perda dissolvida no efluente ou com o gás residual, podem influenciar no resultado teórico de volume do metano, tornando-o mais confiável, porém se tratam de análises mais complexas e significaria um aumento de custo para geração dos dados.

Outro fato observado foi a diferença significativa da produção real de biogás, medida no equipamento instalado na estação, com o da produção teórica calculada. Como o cálculo do volume teórico foi parecido entre as metodologias aplicadas neste estudo, pode-se afirmar que a estimativa teórica de vazão de biogás foi de aproximadamente 402 m³ de biogás por dia, superior em relação com a média do volume real. Verificou-se uma diferença, da ordem de 44%, entre a produção média teórica com a produção média real de biogás. Destaca-se que fatores operacionais, de projeto e de clima da região influenciam nessa diferença. Esses fatores estão associados à perda de biogás para atmosfera, provenientes a emissões fugitivas de metano dissolvido na fase líquida e como gás residual e ao vazamento das tubulações de coleta com sinais de corrosão ou de falta de manutenção. Além disso, a possível falta de manutenção ou calibração do equipamento real instalado pode ter influenciado no resultado, assim como a incidência de chuvas na região.

A eficiência média de remoção da DQO no reator anaeróbico do tipo UASB foi 65%, o que ressalta a elevada atividade biológica no reator. Destaca-se, então, que a concentração de DQO aplicada na estação e a carga orgânica removida são as principais variáveis associadas na produção de biogás durante o estudo.

O reator UASB da ETE Itaipu apresentou uma relação unitária da produção de biogás por carga orgânica removida igual a 0,417 m³ de biogás / kg DQO_{removida}, por meio da produção teórica e 0,234 m³ de biogás / kg DQO_{removida}, por meio da produção real de biogás. Já a relação do volume unitário de biogás produzido por DQO afluente foi de 0,272 m³ de biogás / kg DQO_{afluente} para a produção teórica e 0,152 m³ de biogás / kg

DQO_{afiuente} na produção real. Em relação ao volume unitário de biogás produzido por vazão média de esgoto o resultado na produção teórica e na produção real de biogás foi de 0,119 m³ de biogás / m³ esgoto e 0,067 m³ de biogás / m³ esgoto, respectivamente. Essas relações unitárias são de extrema importância para fornecer subsídios quando da avaliação da alternativa mais viável para a conversão energética do biogás e para cálculos de dimensionamento de futuras estações para tratamento de esgoto doméstico, visando a uma estimativa de produção de biogás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: < <http://atlasesgotos.ana.gov.br/>> Acesso em: 26 out. 2017.
2. CHERNICHARO, C. A. L.; Reatores Anaeróbios. Vol. 5. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, n. I).
3. HIRO, H. O compressor de ar é medido em volume ou massa? Revista Globo Gás Brasil, especializada em gás e energia, 2015.
4. LANNES, L.R.O. Análise comparativa de metodologias de balanço de massa em reatores anaeróbios em estação de tratamento de esgoto. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.
5. LEITE, V.D. Processo de tratamento anaeróbio de resíduos sólidos urbanos inoculados com lodo de esgoto industrial. São Carlos: EESC/USP. 250p. Tese Doutorado, 1997.
6. LOBATO, L. C. S. Aproveitamento Energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: < <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/ENG-8KYNF3>>. Acesso em: 11 de out. 2017
7. METCALF, L.; EDDY, H.P. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5ª ed. Published by McGraw-Hill Education. New York, 2003.
8. PRADO, M.A.C., Produção de biogás no tratamento dos efluentes líquidos de Coffea arabica L. em reator UASB para o potencial aproveitamento na secagem do café. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras. Lavras: UFLA, 2006.
9. PROBIOGÁS, Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft Fur Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Bruno Silveira... [et al.] – Brasília, Ministério das Cidades, 2015. Disponível em: < <http://www.cidades.gov.br/saneamento-cidades/probiogas/publicacoes/publicacoes-do-probiogas>> Acesso em: 26 de out. 2017
10. RAMOS, R.C., Avaliação da influência da operação de descarte de lodo no desempenho dos reatores UASB em estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Brasília, 2008. Disponível em: < <http://repositorio.unb.br/handle/10482/3592>>. Acesso em: 11 de out. 2017
11. SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de Geração de Energia Elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil.2005. Biomassa & Energia, 2005, v.2, n.1.
12. VAN HAANDEL. Tratamento Anaeróbio de Esgotos – Um manual para regiões de clima quente. Epigraf. Campina Grande/PB. 1994.