



II-292 - DETERMINAÇÃO DE METANO DISSOLVIDO EM EFLUENTES DE REATORES UASB: IDENTIFICAÇÃO DA PERDA DE POTENCIAL ENERGÉTICO E DAS EMISSÕES DE GÁS DE EFEITO ESTUFA

Cláudio Leite de Souza

Engenheiro Civil (UFV). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG). Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG).

Sérgio F. Aquino

Químico (UFV). Doutor em Engenharia Química (Imperial College). Professor Adjunto do Departamento de Química da UFOP.

Gilberto Caldeira Bandeira de Melo

Engenheiro Químico (UFMG). Doutor em Ciências de Engenharia pela Universidade de Karlsruhe, Alemanha. Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo⁽¹⁾

Engenheiro Civil e Sanitarista (UFMG). Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne – UK. Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Endereço⁽¹⁾: Av. do Contorno, 842, 7º andar - Centro - Belo Horizonte - MG - CEP: 30110-060 - Brasil - Tel: (31) 3409-1020 - e-mail: calemos@desa.ufmg.br

RESUMO

As emissões de metano para atmosfera têm provocado preocupações da comunidade científica, por se tratar de um gás que contribui cerca de 21 vezes mais que o gás carbônico para o efeito estufa. Além disso, uma grande perda de metano dissolvido no efluente do reator anaeróbico pode comprometer uma importante característica da unidade que é a de proporcionar considerável recuperação energética. Este estudo visa apresentar resultados da concentração de metano dissolvido em efluentes de reatores UASB, a fim de se estimar e discutir sobre a intensidade das perdas de potencial energético pelo metano e também sobre as potenciais emissões de metano no efluente. Para tanto, se utilizou de dois reatores UASB, um na escala demonstração e outro na escala piloto, com dois pontos de amostragem da fase líquida e um ponto de amostragem do biogás para cada reator. Aplicou-se metodologia específica para determinação do metano dissolvido e quantificação da produção de biogás por meio de gasômetros e análise do teor de metano. Os resultados mostraram que a concentração de metano dissolvido no efluente dos reatores foi semelhante e em torno do valor 21 mg/l, o que permitiu constatar uma supersaturação em relação a Lei de Henry. Além disso, as perdas de valor energético obtidas com os cálculos foram expressivas e atingiram, até mesmo, valores superiores a 50% em relação ao total de metano recuperado como biogás. Por outro lado, os fatores de emissão potencial de metano não se revelaram tão expressivos, atingindo valores da ordem de 0,060 gCH₄/gDQO_{removida}.

PALAVRAS-CHAVE: reator UASB, biogás, metano dissolvido, gás de efeito estufa, potencial energético.

INTRODUÇÃO

Os tipos de gases gerados como subprodutos da digestão anaeróbia podem ser bastante variados dependendo do substrato que é submetido ao tratamento. No entanto, em se considerando as rotas normais da digestão anaeróbia da matéria orgânica, essencialmente se têm como produtos finais gasosos metano e dióxido de carbono. Esses constituintes gasosos, em maior ou menor grau, podem estar solubilizados no líquido, o que dificulta, portanto, a sua captura natural e condução para destino adequado. A este respeito van Haandel e Lettinga (1994) comentam que parcela significativa dos gases gerados no processo de tratamento pode permanecer dissolvida no líquido e, assim, sair com o efluente tratado ou encontrar uma outra rota de desprendimento.

De fato, o biogás é produzido em um digestor anaeróbico quando as concentrações dos constituintes na fase líquida excedem as concentrações de saturação (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994). A clássica “Lei de Henry” permite que se calcule, para uma dada pressão parcial de um componente na fase gasosa, a sua concentração de saturação na fase líquida. Assim, normalmente, se tem que o metano é um gás com baixa solubilidade em água, ao passo que o dióxido de carbono é muito solúvel.



Já na década de 1990 alguns pesquisadores levantavam a problemática da perda de metano dissolvido no efluente. Por exemplo, Agrawal *et al.* (1997), fazendo cálculos de perda de metano no efluente de reatores UASB de acordo com a lei de solubilidade de Henry, quantificaram a perda em cerca de 50%. Outras referências levantam a problemática da perda de metano no efluente, no entanto como resultados de cálculos de seus estudos são colocados valores menores da ordem de 15 % (KELLER E HARTLEY, 2003).

Segundo van Haandel e Lettinga (1994), as perdas práticas de metano de reatores UASB podem variar de 20 a 50%, motivadas pela saída de metano dissolvido no efluente e também como resultado da transferência deste gás da superfície da água no reator para atmosfera, dependendo isto do tamanho da superfície líquida e da presença ou não de uma cobertura (hermética) da superfície do reator. Nesse sentido, aparece uma outra rota de fuga de gases do reator que é a superfície líquida de um reator UASB com fase gasosa não controlada.

As emissões de metano para atmosfera têm provocado preocupações da comunidade científica, por se tratar de um gás que contribui cerca de 21 vezes mais que o gás carbônico para o efeito estufa. O CH_4 produzido de tratamento de esgotos constitui cerca de 5% do global de fontes de metano (EL FADEL E MASSOUD, 2001). Segundo Cakir e Stenstrom (2005), o CH_4 dissolvido em efluentes de reatores anaeróbios é o maior contribuinte para a emissão de gases de efeito estufa, nesta tecnologia, especialmente para águas residuárias diluídas, como o esgoto doméstico.

Nesse contexto bastante atual de minoração dos efeitos do inevitável fenômeno de aquecimento global, a diminuição de emissões de gases de efeito estufa e a substituição de fontes de energia não renováveis por renováveis, como as que utilizam biomassa, são estratégias que tem que ser buscadas em todos os empreendimentos, inclusive em estações de tratamento de esgotos.

Nesse sentido, o objetivo principal desse trabalho é apresentar resultados da concentração de metano dissolvido em efluentes de reatores UASB a fim de se estimar e discutir sobre a intensidade das perdas de potencial energético pelo metano e também sobre as potenciais emissões de metano no efluente.

MATERIAL E MÉTODOS

Aparato experimental e fases operacionais

O aparato experimental desta pesquisa foi constituído por dois reatores UASB, sendo um em escala piloto e outro na escala demonstração. A Tabela 1 e as Figuras 1 e 2 mostram as características dos reatores. Os dois reatores se encontram instalados no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS), em área localizada na estação de tratamento de esgotos da bacia do ribeirão Arrudas, em Belo Horizonte. Esta ETE recebe grande parte dos esgotos sanitários gerados pela região metropolitana de Belo Horizonte e uma pequena fração é retirada para alimentar as unidades experimentais, após o esgoto bruto passar pelo tratamento preliminar. Durante o período experimental, de setembro de 2008 a fevereiro de 2009, a concentração do esgoto afluente aos reatores UASB variou entre 228 e 733 mgDQ/L, com concentração mediana igual a 446 mgDQO/L.

Tabela 1: Principais características dos reatores UASB

Características	Reatores UASB	
	Piloto	Demonstraçã o
Diâmetro da seção transversal (m)	0,30	2,00
Altura útil total (m)	4,00	4,50
Volume (m^3)	0,343	14,0
Vazão (l/h)	67	1139
TDH (h)	5	12
Material	Polietileno/Fibra de vidro	Ferrocimento



Figura 1: Vista do reator UASB, escala demonstração, existente no CePTS.



Figura 2: Vista do reator UASB, escala piloto, existente no CePTS.

Amostragem, análise e cálculo para determinação do metano dissolvido

As amostragens para análises de metano dissolvido foram pontuais realizadas em dois dias da semana. Dois foram os pontos amostrais em cada reator, a saber: ponto 1, na parte superior do decantador (antes da zona de influência da camada de espuma) e ponto 2, no efluente imediato do reator (após deixá-lo pela canaleta efluente). A Figura 3 mostra os pontos amostrais em desenho esquemático.

A partir da diferença entre os valores de metano dissolvido no ponto 1 e no ponto 2 (Figura 3) pode-se verificar qual era a influência da região da superfície do decantador, a qual possui em uma considerável área de interface líquido gás e que também constitui em zona de influência da camada de espuma, sobre possíveis consumos imediatos de gás metano. Isto é, pode-se verificar o efeito conjunto do desprendimento do metano para a fase gasosa e da oxidação do metano pela camada de espuma.

O procedimento utilizado para a amostragem e análise de metano dissolvido foi uma adaptação das metodologias descritas por Alberto *et. al.* (2000) e Hartley e Lant (2006). Neste sentido, o seguinte protocolo foi aplicado: coleta-se cerca de 25 ml dos efluentes evitando-se ao máximo turbulências, fechando-se imediatamente os frascos de coleta, após o preenchimento desejado. Para tal se utilizam frascos de antibiótico de 60 ml, tampas de borrachas e lacres de alumínio. Na sequência, após preservação em geladeira até o momento da análise, os frascos são ambientados por pelo menos 50 minutos à temperatura controlada (25°C) e agitados por 10 minutos, com agitadores magnéticos, para permitir o estabelecimento do equilíbrio entre a fase líquida e gasosa, ainda dentro da incubadora. Então a fase gasosa do frasco é amostrada e analisada por cromatografia a gás com injeção de 0,5 ml no injetor manual do aparelho (cromatógrafo Perkin Elmer, detector FID, fluxo de 35 ml/min. com o gás de arraste nitrogênio ultra-puro, coluna empacotada carbowax).

Para o desenvolvimento dos cálculos após a análise de cromatografia, os frascos eram pesados e, a partir da tara de cada frasco, determinava-se a massa de água e, conseqüentemente, o volume de líquido em cada frasco (massa específica da água de 1,0 g/ml) e, por fim, determinava-se o volume da fase gasosa por diferença em relação a capacidade total de 60 ml do frasco. O cálculo então era feito de acordo com a equação 1.

$$[CH_4]_d = \frac{\frac{[\%CH_4]_{gas}}{100} * 654,77 * (V_{gas} + 0,0329 * V_l)}{V_l} \quad \text{equação (1)}$$

Sendo:

$[CH_4]_d$ = concentração de metano dissolvido em mg/l;

$[\%CH_4]_{gas}$ = concentração percentual de metano na fase gasosa do frasco;

654,77 mg/l = massa específica do metano a 25° C;

V_{gas} = volume da fase gasosa;

0,0329 ml/ml = coeficiente de partição para metano em água a 25° C;

V_l = volume da fase líquida.

Medições da produção de metano no biogás

A produção de biogás foi monitorada em gasômetros da marca Ritter®, tipo TG05 para o reator piloto e TG3 para o reator demonstração, com leituras diárias da quantidade produzida. Por sua vez, a caracterização do biogás foi feita a partir de amostragens pontuais (ponto 3 da Figura 3) em dois dias na semana, com análise via cromatografia gasosa (cromatógrafo Perkin Elmer, detector TCD, fluxo de 17 ml/min. com gás de arraste: hélio, coluna empacotada carbowax). Com essas mensurações se obtinha a quantidade volumétrica de metano que é produzida em um dia de operação dos reatores.

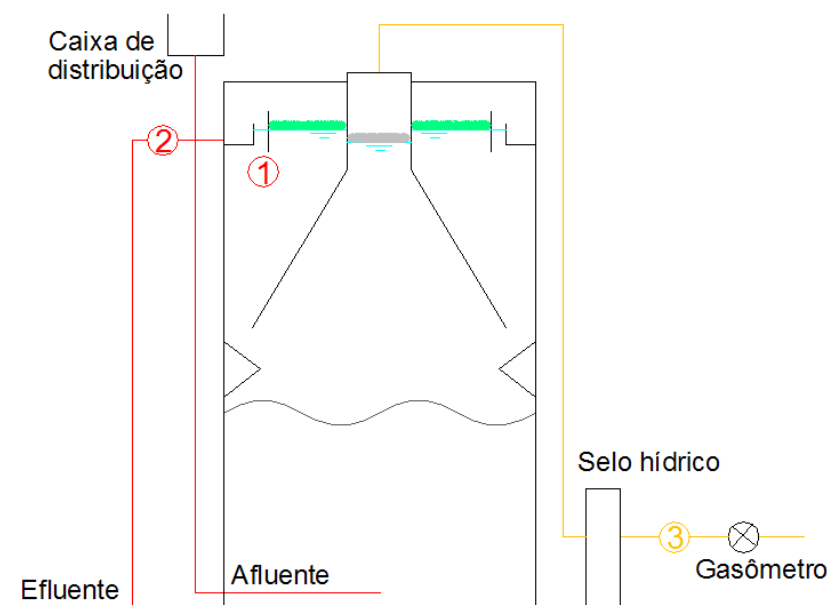


Figura 3: Corte esquemático dos reatores mostrando os pontos monitorados, sendo ponto 1 : efluente na zona superior do decantador; ponto 2: efluente imediato do reator logo após a canaleta de recolhimento; ponto 3: biogás após passar pelo selo hídrico e antes do gasômetro

Cálculo dos percentuais de perda de metano

Com os resultados das análises de metano dissolvido (ponto 1 da Figura 3) e procedendo-se à conversão dessas concentrações para termos de produção volumétrica de metano que deixou o reator dissolvido com o efluente, calculou-se o valor percentual de perda de volume de metano, seja em relação ao volume total de metano gerado (dissolvido + biogás), seja em relação ao volume total de metano produzido como biogás. Para tal, utilizou-se dos valores de tendência central dos dados, representados pelas medianas de cada um dos parâmetros (metano dissolvido, volume diário de metano produzido). A equação 2 mostra a formulação de cálculo da produção volumétrica de metano dissolvido.

$$P_{CH_4} = [CH_4]_d \times Q \times C1 \times C2 \quad \text{equação (2)}$$

Sendo:

P_{CH_4} = produção volumétrica de metano dissolvido (l CH_4 /d);

$[CH_4]_d$ = concentração de metano dissolvido no ponto amostral 1 (mg/l);



Q = vazão de esgoto afluente ao reator (l/d);
 C1 = constante de conversão 1 (1,53 ml CH₄/mg CH₄ a 25°C);
 C2 = constante de conversão 2 (0,001 l /ml).

Cálculo dos fatores de emissão potencial de gás estufa

O cálculo dos fatores de emissão potencial de metano do efluente dos reatores se fez a partir das relações entre a carga de metano dissolvido (g/d) no efluente e as cargas orgânicas afluente e removida (gDQO/d). Para tanto se utilizou das medianas dos parâmetros, isto é, metano dissolvido (ponto 2 da Figura 3) e cargas orgânicas afluente e removida. Naturalmente, a consideração foi de que o metano dissolvido no efluente do reator encontrará condições de ser totalmente emitido para atmosfera, o que é bastante provável.

RESULTADOS

Determinação do metano dissolvido

O monitoramento dos parâmetros desta pesquisa, realizado no período de setembro de 2008 até fevereiro de 2009, pode ser observado pelos gráficos expostos nas Figuras 4 e 5. Tais gráficos revelam a série temporal das medições de metano dissolvido, nos pontos amostrais 1 e 2, para o reator na escala piloto e reator na escala demonstração. Por estas séries temporais verifica-se que não houve tendência de variação dos dados ao longo do tempo, isto é, aparentemente os resultados variaram sempre em torno de uma mesma tendência central, que, numa primeira avaliação, foi em torno de 20 mg/l.

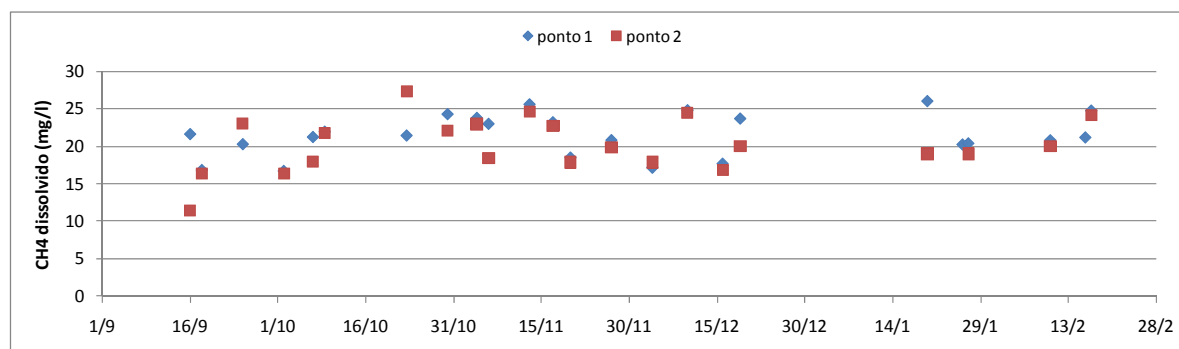


Figura 4: Série temporal de metano dissolvido nos pontos amostrais do reator na escala piloto

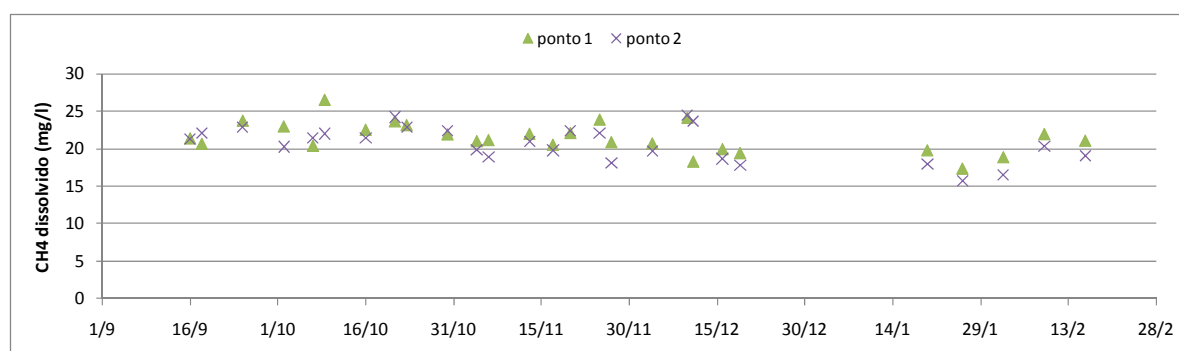


Figura 5: Série temporal de metano dissolvido nos pontos amostrais do reator na escala demonstração

A partir da Figura 6, que mostra as variações estatísticas para os dados de cada ponto amostral em cada reator, verifica-se que a mediana para o ponto 1 do reator piloto se situa próxima do valor 21,5 mg/l e para o reator demonstração, no mesmo ponto, se situa próxima de 21,0 mg/l. Assim, consegue-se concluir, juntamente com todo o padrão de variação para estes pontos (percentis, mínimo e máximo) que não há diferença entre as concentrações de metano dissolvido entre reatores. Portanto, apesar da diferença operacional entre os reatores, consubstanciada, sobretudo, no TDH que, para o reator piloto, é de 5 horas e, para o reator demonstração, é de 12 horas, não há diferença na concentração de metano dissolvido em pontos amostrais equivalentes.



Outra constatação importante é a de que o nível de saturação de metano dissolvido, calculado pela formulação de Henry, para os reatores seria em torno de 13,5 mg/l para o reator piloto (com uma pressão parcial de metano na fase gasosa do separador trifásico de 63%) e de 15,7 mg/l para o reator demonstração (pressão parcial de 73%). Dessa forma, atesta-se que o metano está supersaturado no efluente dos reatores UASB relativamente à saturação calculada a partir da lei de Henry.

Uma possível explicação para estes resultados observados seria que a concentração de metano dissolvido, em torno de 21 mg/l, estaria bastante próxima de um limite máximo de supersaturação de metano em efluente de reator UASB. Além disso, a supersaturação provavelmente ocorre em função de limitações de transferência de massa do metano, da fase líquida para a fase gasosa (PAUSS *et. al.*, 1990). Portanto, a diferença de TDH e de outras características específicas entre os reatores não seriam suficientes para proporcionar minimização destas limitações. Assim, este quadro faria com que os reatores produzissem um efluente com concentrações de metano dissolvido bastante semelhantes.

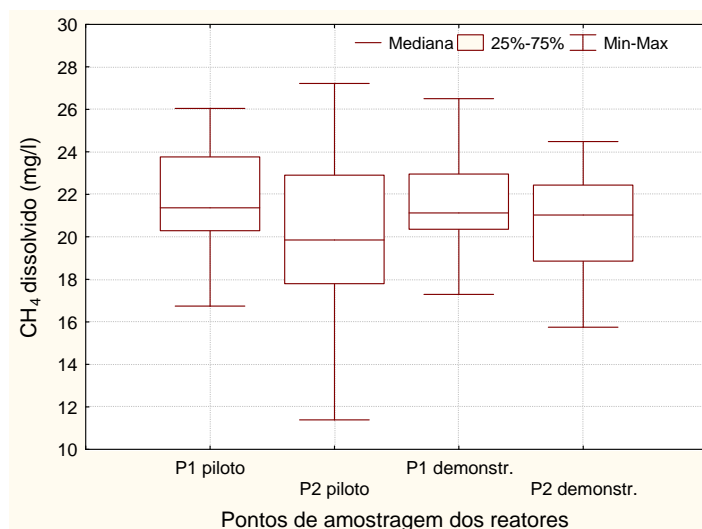


Figura 6: Box-Plot dos dados de metano dissolvido para os pontos amostrais dos reatores UASB (pontos do reator piloto P1: N=24, P2: N=22; pontos do reator demonstração P1 e P2: N=27)

Outra importante informação possível de se extrair da Figura 3 é a perda de metano dissolvido entre os pontos 1 e 2, ou seja, na região da superfície do decantador dos reatores. Levou-se em conta que ambos os reatores apresentam uma camada de espuma na superfície do decantador e que o decantador do reator piloto é fechado e pelo qual passa um fluxo de ar atmosférico de exaustão, ao passo que o decantador do reator demonstração é totalmente aberto para a atmosfera. Com isso, o que se observa é que esta redução de concentração de metano, do ponto P1 para o ponto P2, em ambos os reatores, é muito pequena ou quase inexistente. Talvez, para o reator piloto, o efeito da exaustão provoque uma relativa tendência de desprendimento do metano dissolvido, pois para este reator nota-se uma pequena diferença entre as medianas dos pontos 1 e 2. No entanto, de uma maneira geral, pode-se concluir que a emissão de metano a partir da superfície do decantador ou mesmo que a degradação (oxidação) do metano por meio da camada de espuma não acontecem de maneira considerável nestes reatores UASB.

Medições da produção de metano como biogás

As Figuras 7 e 8 mostram os padrões de variação dos dados de produção volumétrica diária de metano contido no biogás coletado nos dois reatores. Os valores medianos se aproximam de 65 e de 1500 l/d, respectivamente, para o reator piloto e o reator demonstração. As variações entre mínimo e máximo e entre primeiro e terceiro quartis (25 e 75%) são razoavelmente expressivas e provavelmente se relacionem a períodos em que o reator ficou mais vazio ou mais cheio de lodo, isto é, logo após um descarte de lodo a produção de metano pode diminuir consideravelmente em relação a um período em que o reator se aproxima da necessidade de um descarte.

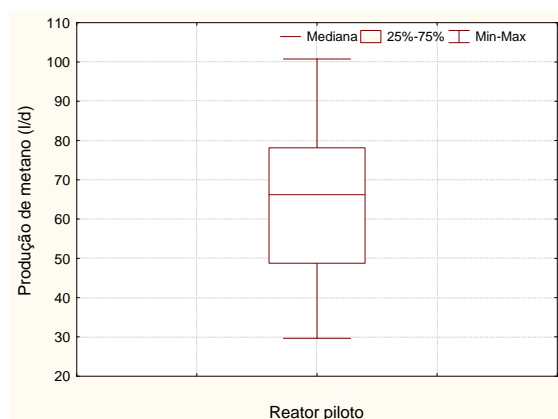


Figura 7: Produção de metano do reator piloto (N=30)

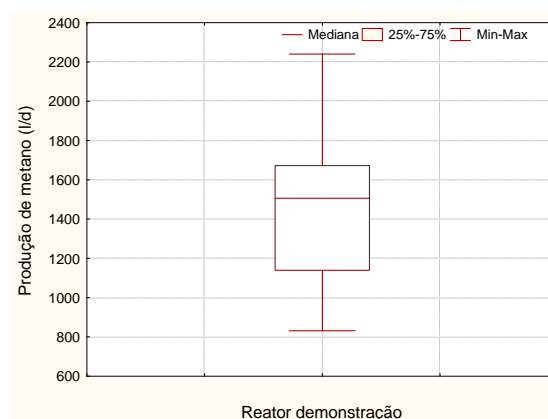


Figura 8: Produção de metano do reator demonstração (N=26)

Cálculo dos percentuais de perda de metano

A partir da formulação genérica mostrada na Equação 2, desenvolveram-se os cálculos que resultaram nos valores finais encontrados na Tabela 2 (terceira coluna), os quais se referem à produção volumétrica de metano dissolvido. Tais valores, comparados com as produções de metano contido no biogás (segunda coluna da Tabela 2), resultaram nos valores percentuais de perdas encontrados nas duas últimas colunas da Tabela 2, para o reator piloto e para o reator demonstração.

Tais valores finais resultaram em perdas percentuais importantes, que atingiram 44,8 %, relativamente a todo o metano gerado no reator (dissolvido + biogás), e 81,2 %, relativamente ao metano capturado com biogás, isto para o reator piloto. De posse destes valores, entende-se que uma grande parte do metano gerado no reator, eventualmente com ordem de grandeza semelhante à parte capturada como biogás, pode ser perdida dissolvida no efluente.

Para o reator demonstração estes valores de perdas percentuais foram razoavelmente menores do que para o reator piloto, mas ainda assim expressivos. Atingiram os valores de 36,9 %, relativamente a todo o metano gerado no reator (dissolvido + biogás), e 58,5 %, relativamente ao metano capturado com biogás. Tal diferença pode realmente estar relacionada com o maior TDH praticado para o reator demonstração, maior que 2 vezes ao do reator piloto (12 horas contra 5 horas).

Assim, com o maior TDH, a extensão da remoção de matéria orgânica tenderia a ser maior, o que implicaria em maior produção de metano, o qual não iria para metano dissolvido, em função do elevado valor de supersaturação encontrado, mas sim incrementando a produção de biogás. Para atestar esta remoção mais elevada de DQO do reator demonstração, calculou-se a partir de dados não mostrados neste trabalho, que a eficiência de remoção do reator demonstração, em termos das medianas das concentrações afluente total e efluente filtrada, foi de 86 %, ao passo que para o reator piloto foi de 77%.

Tabela 2: Produção volumétrica de metano no biogás e dissolvido e perdas de metano dissolvido

Reator	Produção volumétrica de metano (l/d)		Perdas de metano dissolvido (%)	
	Biogás	Dissolvido	Relativamente ao total de CH ₄ gerado	Relativamente ao total de CH ₄ medido com biogás
Piloto	65	52,8	44,8	81,2
Demonstração	1500	877,0	36,9	58,5



Cálculo dos fatores de emissão potencial de gás estufa

Calcularam-se, então, as cargas em massa de metano dissolvido para cada reator, resultando nos valores mostrados Tabela 3 (terceira coluna). Com estes valores e de posse das cargas orgânicas afluente e removida (medianas mostradas nas segunda e terceira colunas) calcularam-se os fatores de emissão contidos nas duas últimas colunas da Tabela 3.

Os fatores de emissão obtidos, primeiramente para o reator piloto, foram de 0,042 gCH₄/gDQO_{apl.} e 0,060 gCH₄/gDQO_{rem.}, que podem até serem considerados pequenos, sobretudo, quando comparados com os fatores de emissão teóricos considerados para o tratamento anaeróbio sem captura e destinação correta do metano gerado, que seriam de 0,250 gCH₄/gDQO_{rem.} e de cerca de 0,200 gCH₄/gDQO_{apl.}, de acordo com as informações contidas no guia para inventário de emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2006).

Para o reator na escala demonstração os valores são um pouco maiores que os do reator na escala piloto, atingindo os valores de 0,047 gCH₄/gDQO_{apl.} e 0,074 gCH₄/gDQO_{rem.}.

Tabela 3: Cargas de DQO e de metano dissolvido e fatores de emissão de metano

Reator	Cargas DQO (g/d)		Carga de metano dissolvido (g/d)	Fator de emissão de metano	
	Afluente	Removida		gCH ₄ /gDQO _{apl.}	gCH ₄ /gDQO _{rem.}
Piloto	768	539	32	0,042	0,060
Demonstração	12200	7782	574	0,047	0,074

CONCLUSÕES

Com base neste estudo realizado, concluiu-se que:

- As concentrações de metano dissolvido nos efluentes dos reatores UASB operados com TDH de 5 horas (escala piloto) e de 12 horas (escala demonstração) foram da mesma ordem de magnitude, totalizando cerca de 21 mg/L;
- A concentração de metano dissolvido nos efluentes dos reatores UASB apresentou-se maior do que a prevista pela Lei de Henry, isto é, o efluente mostrou-se supersaturado de metano dissolvido, em torno de 1,5 vezes;
- O consumo de metano através da região da superfície do decantador dos reatores UASB foi muito pequeno ou inexistente, indicando, portanto, que o desprendimento natural do metano para a atmosfera ou a oxidação pela camada de espuma não são expressivos, seja para reatores fechados ou abertos;
- Apesar das perdas de metano dissolvido no efluente de reatores UASB representarem um importante desperdício de valor energético para a unidade, podendo atingir valores de mais de 50% em relação a todo o metano capturado como biogás, as emissões potenciais de metano (gás estufa) não se mostram tão expressivas, atingindo valores da ordem de 0,060 gCH₄/gDQO_{removida}.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGRAWAL, L. K.; HARADA, H.; OKUI, H. Treatment of Dilute Wastewater in a UASB Reactor at a Moderate Temperature: Performance Aspects. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, v.83, n.2, p.179-184, 1997.
2. ALBERTO, M. C. R.; ARAH, J. R. M.; NEUE, H. U.; WASSMANN, R.; LANTIN, R. S.; ADUNA, J. B.; BRONSON, K. F. A sampling technique for the determination of dissolved methane in soil solution. *Chemosphere: Global Change Science* 2 (2000), v.2, p.57-63, 2000.
3. CAKIRA, F. Y.; STENSTROMB, M. K. Greenhouse gas production: A comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology. *Water Research*, v.39, p.4197-4203, 2005.
4. EL FADEL, M.; MASSOUD, M. Methane emissions from wastewater management. *Environmental Pollution*, v.114, p.177-185, 2001.



5. HARTLEY, K.; LANT, P. Eliminating Non-Renewable CO₂ Emissions From Sewage Treatment: An Anaerobic Migrating Bed Reactor Pilot Plant Study. *Biotechnology and Bioengineering*, v.95, n.3, p.384-398, 2006.
6. IPCC, 2006. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.
7. KELLER, J.; HARTLEY, K. Greenhouse gas production in wastewater treatment: process selection is the major factor. *Water Science and Technology*, v.47, n.12, p.43 48, 2003.
8. PAUSS, A., ANDRE, G., PERRIER, M., GUIOT, S. R. Liquid-to-gas mass transfer in anaerobic processes: Inevitable transfer limitations of methane and hydrogen in the biomethanation process. *Appl. Environ. Microb.* 1990, 56, 1636-1644
9. VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgoto. Um manual para regiões de clima quente.ed. Campina Grande, Brasil: Universidade Federal da Paraíba, 1994.