

## **XI-079 - VALIDAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO**

**Lívia Cristina da Silva Lobato<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil. Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

**Carlos Augusto de Lemos Chernicharo**

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

**André Pereira Rosa**

Engenheiro Ambiental. Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

**Claúdio Leite de Souza**

Engenheiro Civil. Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Antônio Carlos, 6627 - UFMG/EE/DESA Bloco 2, sala 4541 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-901 - Brasil - Tel: (31) 3409-1025 - e-mail: andrerosa@ufmg.br

### **RESUMO**

O trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático que pudesse estimar, com maior precisão, a parcela de DQO recuperada como metano no biogás e que, efetivamente, representasse o potencial de recuperação de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico. O modelo buscou incluir todas as rotas de conversão e perdas no reator, incluindo a parcela de DQO utilizada para redução de sulfato e as perdas de metano nos gases residuais e dissolvida no efluente. Resultados da produção de biogás em reatores UASB, de pequena e larga escala, foram usados para validar o modelo. Os resultados mostraram que o modelo permitiu uma estimativa mais realista da produção de biogás e de seu potencial energético.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reator UASB, biogás, recuperação de energia, perdas de metano.

### **INTRODUÇÃO**

O metano gerado em reatores UASB pode estar dissolvido no efluente ou presente no biogás coletado no interior do separador trifásico ou no gás residual liberado na superfície do compartimento de decantação.

Souza *et al.* (2010), ao medir a concentração de metano dissolvido em efluentes de reatores UASB tratando esgoto doméstico, em diferentes escalas (piloto, demonstração e real), obteve concentrações variando de 17 a 22 mg.L<sup>-1</sup>. Em termos de balanço de massa da DQO, Singh *et al.* (1996) quantificaram a perda de metano no efluente de reatores UASB em 28 a 39%. Seghezzeo (2004) levanta a problemática da perda de metano no efluente e em seu estudo obteve para essa parcela um valor da ordem de 18 % da DQO total afluente. Os valores obtidos para a perda de metano dissolvido no efluente de reatores UASB, embora bastante variável, mostram que essa parcela é bastante significativa. As perdas de metano dissolvido no efluente ou no gás residual representam uma perda do potencial de energia e, portanto, precisam ser consideradas nos balanços de massa de DQO.

Outra parcela importante no balanço de massa de DQO, e que muitas vezes não é considerada, refere-se à DQO utilizada para a redução do sulfato presente no esgoto doméstico. A presença de sulfato faz com que ocorra uma competição por substrato entre as bactérias redutoras de sulfato (BRS) e as bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas, o que acarreta na produção de dois produtos finais: metano (metanogênese) e sulfeto (sulfetogênese). Dessa forma, a concentração de sulfato no esgoto doméstico acarreta em uma diminuição da parcela da DQO convertida em CH<sub>4</sub>, uma vez que parte da DQO será utilizada pelas BRS. Glória *et al.* (2008), monitorando o sulfeto de hidrogênio em reatores UASB tratando esgoto doméstico obtiveram para o sulfato, concentrações afluente variando entre 20 a 60 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.L<sup>-1</sup>.

Considerando-se que o potencial de produção e recuperação de biogás em reatores UASB que tratam esgoto doméstico é considerado baixo (Noyola *et al.*, 2006), raramente resultando em algum tipo de aproveitamento energético (o biogás usualmente é queimado), torna-se importante o desenvolvimento de modelos que permitam estimar, com maior precisão, o efetivo potencial energético que pode ser recuperado, como também os fatores de emissão de metano (perdas). Para resultados mais precisos, o balanço de massa deve considerar todas as principais rotas de conversão, bem como as perdas possíveis. Portanto, as parcelas que devem ser consideradas no balanço de massa da DQO são: (i) parcela convertida a metano presente no biogás; (ii) parcela convertida a metano que escapa dissolvido no efluente e junto ao gás residual (perdas); (iii) parcela utilizada na redução de sulfato; (iv) parcela convertida em lodo e (v) parcela que sai solubilizada no efluente.

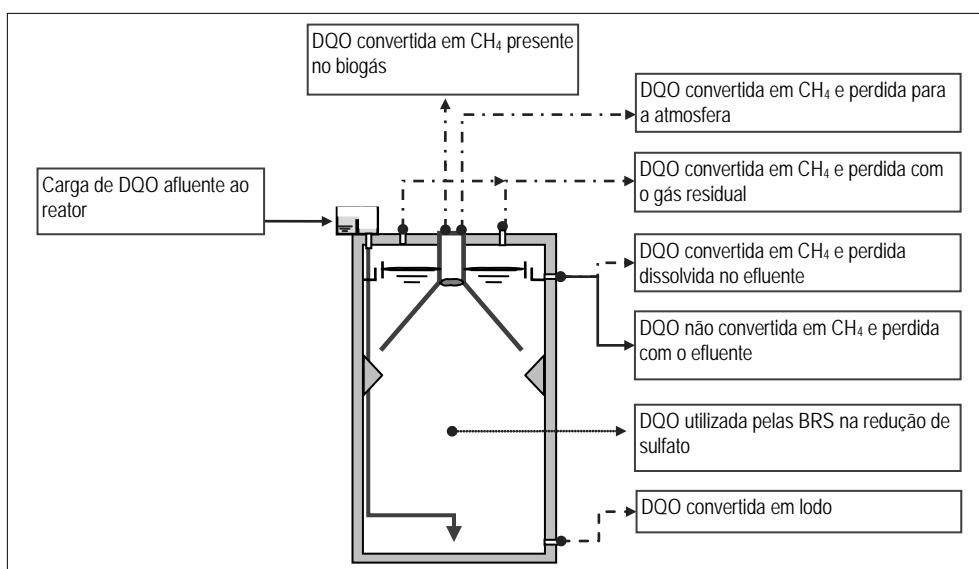
O balanço de massa da DQO pode ser uma ferramenta útil para esclarecer o fluxo de matéria orgânica no reator, avaliar a performance do processo, além de validar métodos e parâmetros. Importantes aplicações do balanço de massa da DQO em reatores UASB consistem na verificação do real potencial energético que pode ser recuperado e dos fatores de emissão de metano do efluente dos reatores.

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um modelo matemático que melhor representasse o balanço de massa da DQO e do potencial de recuperação de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico.

## MATERIAL E MÉTODOS

O modelo matemático para o cálculo do balanço de massa da DQO e do potencial energético foi estruturado em uma planilha eletrônica, com reduzido número de dados de entrada, com o intuito de facilitar a sua utilização de forma mais ampla. Conceitualmente, o modelo foi estruturado de acordo com as rotas de conversão de DQO e fluxos de metano em reatores UASB representados na Figura 1.

O modelo foi desenvolvido considerando três situações que acarretam em diferentes potenciais de recuperação de metano: (i) pior situação; (ii) situação típica e (iii) melhor situação. A pior situação, onde o potencial energético é menor, refere-se a sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano. A melhor situação refere-se a sistemas operando com esgoto mais concentrado, menores concentrações de sulfato, maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano. Para a situação típica são utilizados valores intermediários para os dados de entrada.



**Figura 1:** Rotas de conversão de DQO e fluxos de metano em reatores UASB

Fonte: Lobato (2011)

Os dados de entrada considerados na simulação são os seguintes, sendo os valores apresentados na Tabela 1: população contribuinte; contribuição per capita de esgoto; contribuição per capita de DQO; eficiência esperada de remoção de DQO; concentração de sulfato no afluente; eficiência de redução de sulfato; temperatura operacional do reator; perda com o gás residual; outras perdas (ex. vazamentos); perda de CH<sub>4</sub> dissolvido com o efluente e percentual de CH<sub>4</sub> no biogás.

**Tabela 1:** Dados de entrada considerados no modelo

Parâmetro	Unidade	Situação		
		Pior	Típica	Melhor
População contribuinte (Pop)	hab.	1.000 a 1.000.000		
Contribuição per capita de esgoto (QPC)	m <sup>3</sup> .hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	0,12 a 0,22		
Contribuição per capita de DQO (QPC <sub>DQO</sub> )	kg.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	0,09 a 0,11		
Eficiência esperada de remoção de DQO (E <sub>DQO</sub> )	%	60	65	70
Concentração de sulfato no afluente (C <sub>SO<sub>4</sub></sub> )	kgSO <sub>4</sub> .m <sup>-3</sup>	0,08	0,06	0,04
Eficiência de redução de sulfato (E <sub>SO<sub>4</sub></sub> )	%	80	75	70
Temperatura operacional do reator (T)	°C	20 a 30		
Perda com o gás residual (p <sub>w</sub> )	%	7,5	5,0	2,5
Outras perdas (ex. vazamentos) (p <sub>o</sub> )	%	7,5	5,0	2,5
Perda de CH <sub>4</sub> dissolvido com o efluente (p <sub>L</sub> )	kg.m <sup>-3</sup>	0,025	0,020	0,015
Percentual de CH <sub>4</sub> no biogás (C <sub>CH<sub>4</sub></sub> )	%	70	75	80

Fonte: Lobato (2011)

A variabilidade nos dados de entrada (Pop, QPC, QPC<sub>DQO</sub> e T) foi incorporada à interpretação dos resultados do modelo, através da Análise da Incerteza, a qual se baseia na execução de um elevado número de simulações (nesse caso 250 simulações para cada situação), configurando a denominada simulação Monte Carlo. Em cada corrida do modelo é selecionado um conjunto diferente de valores dos dados de entrada sobre os quais existe incerteza, os quais foram gerados aleatoriamente segundo a distribuição uniforme e dentro de faixas pré-estabelecidas.

Definidos os dados de entrada, primeiramente são estimadas as parcelas de DQO removida no sistema, convertida em lodo e consumida na redução do sulfato. Com essas parcelas calcula-se a DQO máxima convertida em CH<sub>4</sub> e a consequente produção volumétrica. A fim de se calcular o volume de CH<sub>4</sub> realmente disponível para o aproveitamento energético, o modelo considera as perdas de CH<sub>4</sub> dissolvido no efluente e na fase gasosa com o gás residual, além de outras perdas eventuais na fase gasosa (ex. vazamentos). Por fim, descontadas essas perdas, o potencial energético disponível é calculado.

Após as simulações procedeu-se a validação do modelo, a partir de resultados reais de produção de biogás e composição de metano para reatores UASB em diferentes escalas, conforme características principais apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Principais características dos reatores UASB utilizados para validação do modelo

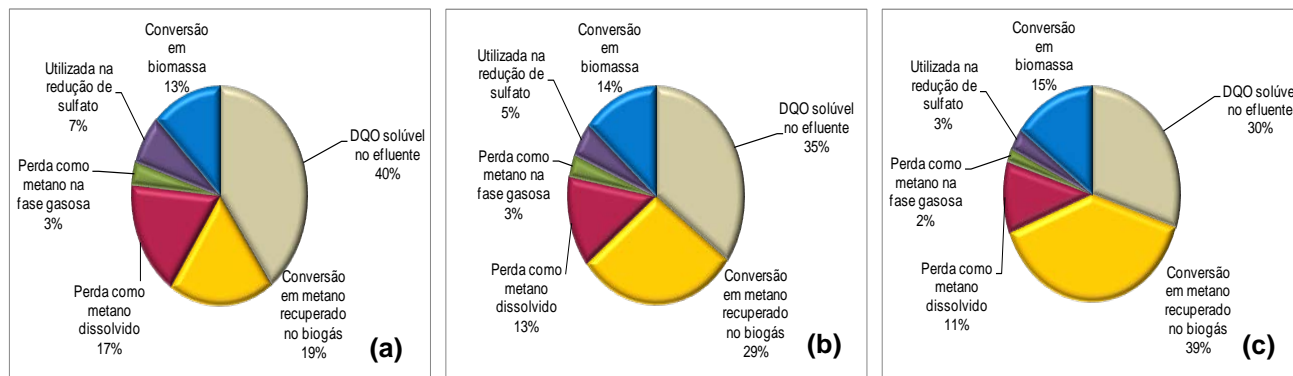
Característica	R <sub>piloto</sub>	R <sub>demonstração</sub>	ETE Onça	ETE <i>Laboreaux</i>
Localização	CePTS*	CePTS*	Belo Horizonte – Brazil	Itabira - Brazil
População (hab.)	8	140	1.000.000 (2.000.000)	70.000 (123.000)
Vazão (L.s <sup>-1</sup> )	0,02	0,32	2.000 (4.000)	170 (310)
Número de unidades	1	1	24 (48)	8 (16)
Dimensões (m)	D = 0,3	D = 2,0	38,4 × 6,4	21,7 × 6,2
Profundidade útil (m)	4,0	4,5	4,5	4,5
Volume útil (m <sup>3</sup> )	0,36	14,0	2.211,9	1.210,9

(\*) Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento – Belo Horizonte – Brazil

( ) Valores indicados em parênteses referem-se ao fim de plano.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são apresentados os valores médios obtidos a partir das simulações realizadas, na qual pode-se observar a contribuição de cada parcela no balanço de massa da DQO, para as três situações analisadas (pior, típica e melhor).



**Figura 2:** Resultado das simulações de balanço de DQO em reatores UASB tratando esgoto doméstico em relação a DQO afluente, para as três situações: (a) pior; (b) típica (c) melhor

Fonte: Lobato (2011)

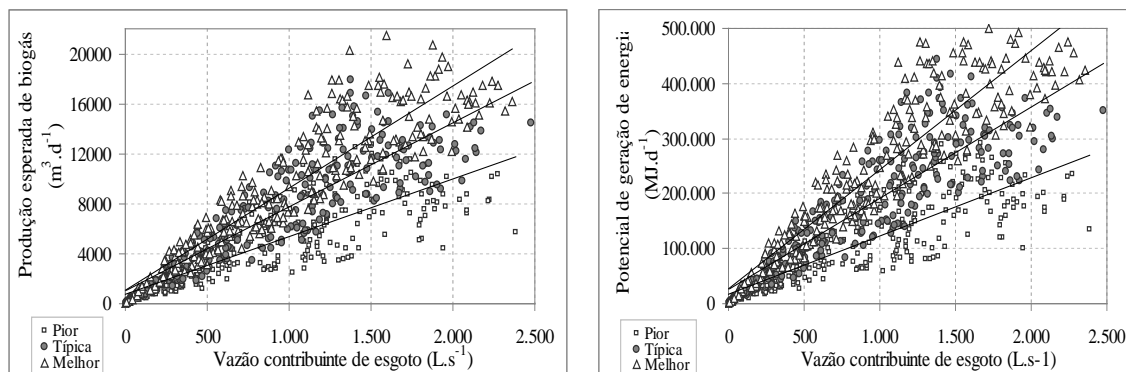
A conversão em biomassa foi responsável por 13 a 15% da DQO aplicada ao sistema. Em relação às simulações de concentrações de sulfato no afluente (variando entre 40 e 80 mg.L<sup>-1</sup>), foram obtidos percentuais de utilização de DQO para redução de sulfato variando entre 3 a 7%.

Para os índices simulados de perda de metano com o efluente (variando entre 15 e 25 mg.L<sup>-1</sup>), 11 a 17% da carga de DQO aplicada ao sistema foi convertida em metano não recuperado no biogás, mas sim perdido dissolvido no efluente.

A parcela de DQO afluente efetivamente convertida em CH<sub>4</sub> presente no biogás, que representa o efetivo potencial de recuperação de energia, variou de 19% para a pior situação até 39% para a melhor situação. Por se tratar de esgoto doméstico, no qual a relação DQO/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> é elevada, a metanogênese (soma das parcelas de DQO convertida em CH<sub>4</sub>) é preponderante em relação à sulfetogênese (39 a 52% contra 3 a 7% da DQO afluente, respectivamente).

Na pior situação, de toda a DQO convertida em CH<sub>4</sub>, em média 39%, apenas 19% refere-se a parcela de CH<sub>4</sub> coletada no separador trifásico e disponível para utilização, o que representa uma perda de cerca de 50% de potencial energético. Já na melhor situação, em média 52% da DQO é convertida em CH<sub>4</sub>, sendo 39% referente a parcela de CH<sub>4</sub> disponível para utilização, o que caracteriza uma perda de potencial energético de apenas 25%. Desta forma, para uma dada concentração de DQO afluente e eficiência de remoção no reator, a perda de metano dissolvido no efluente passa a ser fator extremamente importante no balanço energético do sistema.

Na Figura 3 são apresentados os resultados de simulações efetuadas para a produção de biogás e de potencial de recuperação de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Considerou-se nas simulações a variação da população contribuinte de 0 a 1 milhão de habitantes (correspondente a vazões contribuintes de 0 a 2,5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>).



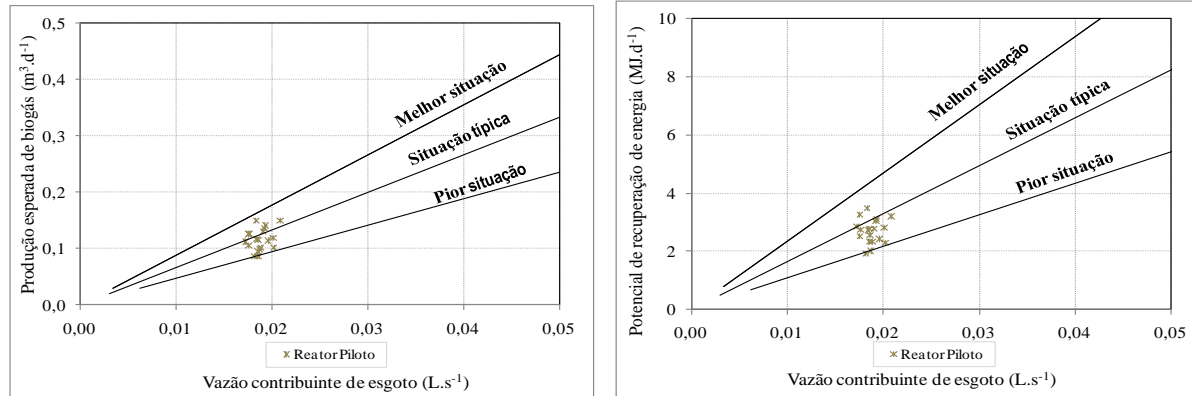
**Figura 3:** Faixas esperadas de produção de biogás e de potencial de recuperação de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico.

Fonte: Lobato (2011)

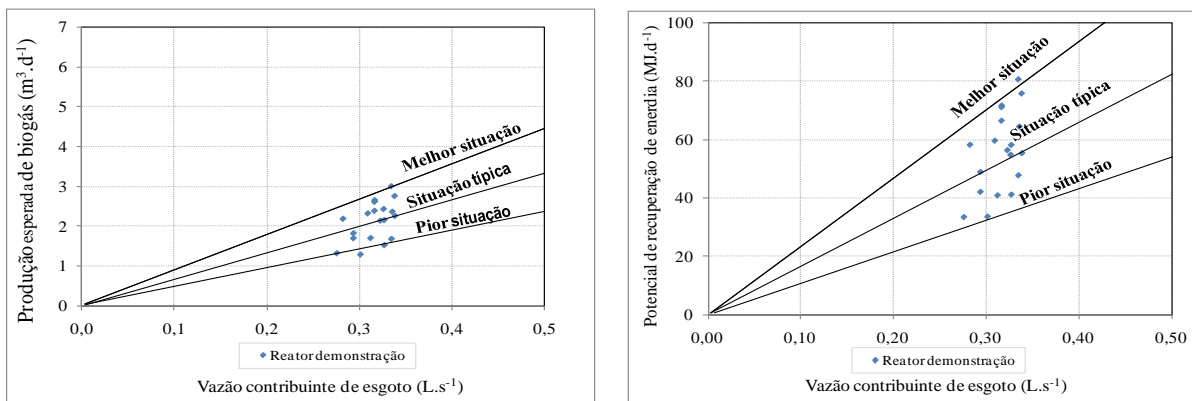
Podem ser obtidos valores bastante dissonantes de produção de biogás e de potencial de geração de energia, a depender das variáveis de entrada. Considerando, por exemplo, uma população de 1 milhão de habitantes ( $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), a produção esperada de biogás pode variar de 10.000 a 20.000  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , já para o potencial de geração de energia os valores encontrados variam de 250.000 a 500.000  $\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ .

### Validação do modelo matemático

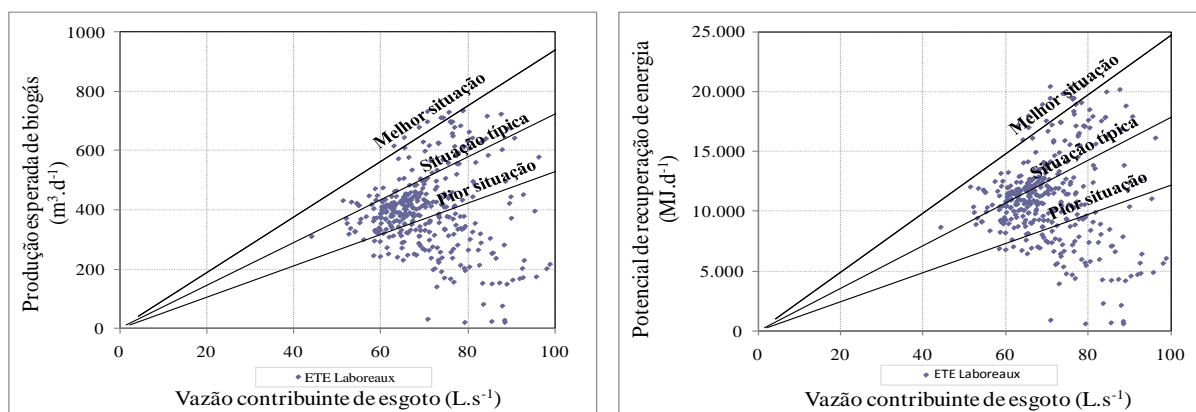
Os resultados reais de produção de biogás e de potencial de recuperação de energia, para os reatores UASB utilizados para validação do modelo, foram plotados no mesmo gráfico onde aparecem as linhas de tendência dos resultados obtidos nas simulações (Figuras 4 a 7).



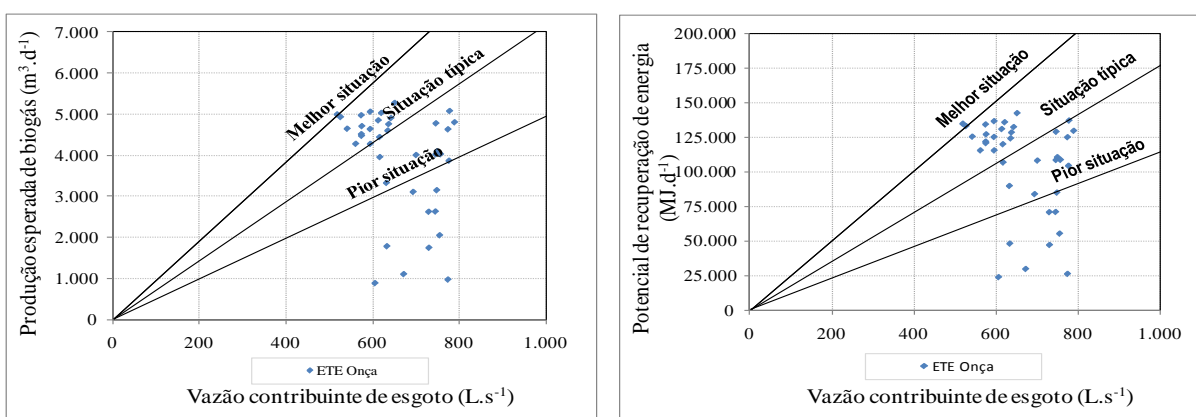
**Figura 4:** Validação do modelo a partir dos dados de monitoramento do reator UASB escala piloto.



**Figura 5:** Validação do modelo a partir dos dados de monitoramento do reator UASB escala de demonstração.



**Figura 6:** Validação do modelo a partir dos dados de monitoramento da ETE *Laboreaux*



**Figura 7:** Validação do modelo a partir dos dados de monitoramento da ETE *Onça*

Observa-se que os resultados para a produção de biogás e o consequente potencial de recuperação de energia dos reatores UASB em escala piloto e demonstração (Figuras 4 e 5), obtidos a partir de dados experimentais, ficaram dentro das faixas simuladas. Os valores médios obtidos para o reator UASB piloto foram  $0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  para a produção de biogás, e  $2,7 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$  para o potencial energético recuperado, considerando a vazão média afluente a esse reator igual a  $0,02 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $1,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ). Para o reator UASB em escala de demonstração, considerando a vazão média afluente igual a  $0,32 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $27,3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ), foram obtidos para a produção de biogás e potencial energético recuperado,  $2,1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  e  $55,8 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ , respectivamente.

Já para os reatores em escala real (Figuras 6 e 7), verifica-se que a maior parte dos resultados de produção de biogás e de potencial de recuperação de energia concentraram-se entre as faixas simuladas para a situação típica e pior, no entanto, alguns dados de ambas as estações fogem a esses limites. A produção de biogás nos reatores UASB da ETE *Laboreaux* foi da ordem de  $390 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , resultando em um potencial energético da ordem de  $11.000 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$  ( $28,2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \text{ biogás}$ ). Para os reatores UASB da ETE *Onça*, os valores médios observados foram de  $3.900 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  para a produção de biogás, e de  $105.000 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$  para o potencial energético recuperado ( $26,9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \text{ biogás}$ ).

A maior aderência ao modelo dos resultados dos reatores em escala piloto e demonstração pode ser explicada pelas menores variações da concentração do esgoto afluente e também pela maior precisão dos medidores de vazão de biogás utilizados no CePTS. No caso das duas estações em escala plena, são recorrentes os problemas de excessiva diluição do esgoto afluente, devido a contribuições de águas de chuva, que resultam na redução da produção de biogás. Ademais, a falta de calibração dos medidores de biogás em alguns períodos pode ter ocasionado medições errôneas.



## CONCLUSÕES

O modelo matemático desenvolvido possibilitou melhor representação do balanço de massa da DQO e do potencial de recuperação de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Os resultados das simulações realizadas mostraram que o modelo possibilita uma estimativa mais realista da quantidade de biogás que pode ser recuperada no interior dos separadores trifásicos, a qual representa, efetivamente, a parcela disponível para aproveitamento energético.

A incorporação, ao modelo, das perdas de metano dissolvido no efluente e na fase gasosa, bem como da parcela de DQO utilizada para redução de sulfato, pode ser considerada um avanço, uma vez que os modelos disponíveis usualmente superestimam a produção de biogás e o potencial de recuperação de energia em reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de esgoto doméstico.

Ao considerar no balanço de massa da DQO todas as parcelas envolvidas na digestão anaeróbia, bem como as perdas possíveis, são obtidos valores para a produção teórica de  $\text{CH}_4$  coletado e disponível para recuperação de energia mais próximos dos valores reais medidos em campo. Isso pode ser confirmado pela validação do modelo matemático desenvolvido nesse trabalho, a partir de resultados para a produção de biogás e porcentagem de  $\text{CH}_4$  obtidos em reatores UASB em diferentes escalas (piloto, demonstração e real).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LOBATO, L. C. S. aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. 2011. 173 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
2. NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J.M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J.E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology*, v.5, p. 93-114, 2006.
3. SEGHEZZO, L. *Anaerobic Treatment of domestic wastewater in subtropical regions*. p. 133 Wageningen University. Wageningen, The Netherlands, 2004.
4. SINGH, K. S.; HARADA, H.; VIRARAGHAVAN, T. low-strength wastewater treatment by a UASB reactor. *Bioresource Technolog*, v. 55, p. 187-194, 1996.
5. SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C.A.L.; AQUINO, S. F. Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. In: 12<sup>th</sup> WORLD CONGRESS ON ANAEROBIC DIGESTION, 2010, Guadalajara, Jalisco – México. *Proceedings...*México: IWA, 2010.