

II-537 - DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS SUBPRODUTOS BIOGÁS E LODO EM ETES OPERANDO COM REATORES UASB

André Pereira Rosa⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental. Doutorando 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.

Livia Cristina da Silva Lobato

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

Endereço⁽¹⁾: 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: calemos@desa.ufmg.br

RESUMO

Sabe-se que o Brasil não explora o potencial energético dos subprodutos gerados em ETES, em especial o lodo e o biogás de reatores UASB. Um modelo matemático foi desenvolvido para a estimativa do potencial energético, a fim de demonstrar a energia contida nestes subprodutos. O modelo matemático foi desenvolvido considerando três situações que acarretam em diferentes potenciais de recuperação de energia dos subprodutos biogás e lodo excedente: (i) pior situação; (ii) situação típica e (iii) melhor situação. A estimativa foi realizada para populações de até 1.000.000 habitantes. A diluição do esgoto, índices de perda de metano, características de lodo gerado no sistema UASB, dentre outros, contribuíram para os dados de entrada dos cenários. A variabilidade nos dados foi incorporada à interpretação dos resultados do modelo, através da Análise da Incerteza (250 simulações para cada situação), configurando a denominada Simulação Monte Carlo. As simulações para o lodo consideraram as alternativas de (i) filtro prensa; (ii) leito de secagem e (iii) centrífuga. Para o biogás observou-se uma variação na produção de energia para valores médios dentro da faixa de 1,8 a 4,8 MJ.m⁻³ e uma produção de energia por habitante variando de 0,4 a 0,5 MJ.hab⁻¹.d⁻¹. O potencial energético do lodo desidratado foi influenciado principalmente pela umidade do lodo desidratado, indicando piores condições de obtenção de energia a partir do lodo de centrífugas. Avaliou-se que independentemente das propriedades do lodo desidratado, o biogás é o principal subproduto a ser aproveitado energeticamente em ETES. O modelo proposto apresentou indicativos favoráveis para sua aplicação como ferramenta na determinação do potencial energético de ETES, através do uso do biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo matemático, potencial energético, lodo, biogás, reator UASB, tratamento de esgoto.

INTRODUÇÃO

Sabe-se que o aproveitamento energético do biogás ainda é muito incipiente no Brasil, sendo que a grande maioria dos aterros sanitários e das estações de tratamento de esgoto doméstico e efluentes industriais apenas coleta e queima o biogás gerado. Em adição, para a realidade brasileira, o lodo excedente tem sido encaminhado a aterros sanitários e o potencial de recuperação de energia não é explorado pelas estações de tratamento.

O conteúdo energético do biogás, com poder calorífico entre 21,5 e 25,1 MJ/Nm³ (considerando concentrações de metano entre 60 e 70%), pode ser recuperado para diferentes aplicações, tais como: (i) uso direto como combustível em caldeiras, fornos e estufas, em substituição a outros tipos de combustíveis; (ii) geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia; (iii) cogeração de eletricidade e calor e (iv) combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou o aproveitamento como combustível veicular.

O lodo, muitas vezes caracterizado como um resíduo passível de aterramento, pode se tornar fonte de energia após a desidratação, evidenciando a mudança do paradigma para o seu destino final (COURTAUD *et al.*, 2010). Este cenário aponta para a tendência de aproveitamento do lodo visando à produção de energia em benefício das ETEs, muito embora os estudos nessa área ainda não sejam muito difundidos (DE SENA *et al.*, 2007).

A sustentabilidade energética é um dos principais pontos a ser desenvolvido no futuro das ETEs. Para tanto são necessários estudos que levem em consideração: (i) o potencial energético dos subprodutos nas estações; (ii) o consumo ou demanda de energia para o funcionamento pleno das ETEs; (iii) potencial de geração de energia em benefício da estação, seja ela na forma térmica ou elétrica, dependendo da necessidade e demandas locais.

O potencial energético dos subprodutos está relacionado com as características do lodo e com a produção e composição de biogás, dessa forma, o potencial otimizado relaciona-se, dentre outros aspectos, com um esgoto mais concentrado, maiores eficiências de remoção de DQO e menores índices de perda de metano (LOBATO, 2011).

A geração de energia livre, elétrica ou térmica, será maior, quando maior for a diferença entre o potencial de geração e o consumo de energia pela estação. Parte-se do princípio que a energia gerada pelos subprodutos pode ter como objetivo principal a geração de eletricidade ou o processo de cogeração. Estudos mais aprofundados devem ser realizados para o prognóstico das diversas condições de operação das estações, facilitando a tomada de decisão quanto à forma de gerenciamento dos subprodutos lodo e biogás, visando potencializar os benefícios ambientais, sociais e econômicos destes nas ETEs.

Diante desse contexto, este trabalho buscou desenvolver um modelo matemático para a estimativa do potencial energético dos subprodutos biogás e lodo excedente de reatores UASB gerados em ETEs de diferentes portes. No estudo, consideradas as eficiências de conversão dos equipamentos, estimou-se o potencial bruto de geração de energia para uso na estação.

MATERIAL E MÉTODOS

Desenvolvimento do modelo matemático

O modelo matemático foi estruturado em uma planilha eletrônica, tendo como premissas básicas a simplicidade e o reduzido número de dados de entrada. De maneira geral, o modelo matemático foi desenvolvido considerando três situações que acarretam em potenciais de recuperação e energia dos subprodutos biogás e lodo excedente: (i) pior situação; (ii) situação típica e (iii) melhor situação. A estimativa foi realizada para populações de até 1.000.000 habitantes.

Na pior situação, o potencial energético é menor, e relaciona-se com sistemas operando com esgoto mais diluído, maiores concentrações de sulfato, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano (LOBATO, 2011). Para o lodo, considerou-se elevada concentração de cinzas e baixas concentrações de hidrogênio na constituição do lodo.

A melhor situação, maior potencial energético, 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 (LOBATO, 2011). Para o lodo, considerou-se baixa presença de cinzas e elevadas concentrações de hidrogênio e sólidos fixos no lodo. Para a situação típica são utilizados valores intermediários para os dados de entrada.

Dados de entrada do modelo

Os dados de entrada necessários aos cálculos do potencial energético do biogás são: população contribuinte, contribuição *per capita* de esgoto (QPC), contribuição *per capita* de DQO (QPC_{DQO}), eficiência de remoção de DQO (E_{DQO}), concentração de sulfato no afluente (C_{SO_4}), eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}), temperatura operacional do reator (T) e percentual de CH_4 no biogás (C_{CH_4}).

Para a parcela referente à estimativa do potencial energético do lodo foram levados em consideração: coeficiente de produção de lodo, massa específica, concentração de sólidos secos, captura de sólidos na

unidade de desidratação, concentração de sólidos no lodo desidratado, massa específica do lodo desidratado, teor de carbono, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e cinzas. O modelo previu a estimativa do potencial de geração de energia através do estudo de três alternativas de desidratação (filtro prensa, leito de secagem e centrífuga). A Tabela 1 apresenta os dados de entrada utilizados no modelo para a estimativa do potencial energético dos subprodutos biogás e lodo.

A variabilidade nos dados de entrada apresentada por faixas de valores (Tabela 1) 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. Desta forma, os dados de entrada foram gerados aleatoriamente segundo a distribuição uniforme e dentro de faixas pré-estabelecidas. Lobato (2011) demonstrou a validação do modelo para biogás. O presente estudo não teve como objetivo a validação do modelo proposto para a determinação do potencial energético do lodo e total dos subprodutos, apesar de demonstrar a adequação do modelo para a ETE Laboreaux, Itabira, a qual é descrita por CHERNICHARO *et al.* (2009).

Estudo do potencial energético dos subprodutos biogás e lodo

O potencial de recuperação energético do biogás seguiu metodologia descrita por Lobato (2011). Para o estudo do potencial energético do lodo gerado em reatores UASB fez-se necessário avaliar inicialmente a quantidade de lodo produzido por um reator anaeróbio. A tabela 2 apresenta o detalhamento dos cálculos para a estimativa do potencial energético das parcelas: biogás e lodo.

Após a determinação da produção de lodo, foi prevista a determinação da massa total de lodo gerada após a etapa de desidratação. As simulações consideram as alternativas de (i) filtro prensa; (ii) leito de secagem e (iii) centrífuga.

Tabela 1: Dados de entrada para biogás e lodo considerados no modelo.

Componente	Parâmetro	Unidade	Situação		
			Pior	Típica	Melhor
LODO E BIOGÁS	População contribuinte (Pop)	hab.	1.000 a 1.000.000		
	Contribuição <i>per capita</i> de DQO	kg.hab ⁻¹ .d ⁻¹	0,09 a 0,011		
BIOGÁS	Contribuição <i>per capita</i> de esgoto	m ³ .hab ⁻¹ .d ⁻¹	0,12 a 0,22		
	Eficiência de remoção de DQO	%	60	65	70
	Concentração de sulfato no afluente	kgSO ₄ .m ⁻³	0,08	0,06	0,04
	Eficiência de redução de sulfato	%	80	75	70
	Temperatura operacional do reator	°C	20 a 30		
	Percentual de CH ₄ no biogás	%	70	75	80
	Lodo gerado no reator UASB				
Massa específica	kg.m ⁻³	1.020 a 1.030			
Concentração de sólidos secos	%	3 a 6			
Coefficiente de produção de sólidos	kg SS.kgDQO _{aplicada} ⁻¹	0,18			
Lodo gerado na unidade de desidratação (filtro prensa, leito de secagem e centrífuga)					
LODO EXCEDENTE	Captura de sólidos	%	90 a 98 ¹		
	<i>Concentração do lodo desidratado</i>				
	Filtro prensa	%	29-35		
	Leito de secagem	%	30-40		
	Centrífuga	%	20-25		
	<i>Características do lodo desidratado</i>				
	Massa específica do lodo desidratado	kg.m ⁻³	1.050 a 1.080		
	Teor de carbono, b.s.	%	20	30	40
	Teor de hidrogênio, b.s.	%	2	4	10
	Teor de nitrogênio, b.s.	%	2	2	2
Teor de oxigênio, b.s.	%	21	24	23	
Teor de cinzas, b.s.	%	55	40	25	

¹As faixas de valores diferem para a centrífuga, sendo 90 a 95 (captura de sólidos). b.s.: base seca.

Fonte: Adaptado de Lobato (2011) e Andreoli (2001)

Tabela 2: Equações para cálculo da produção de lodo anaeróbico no reator UASB.

Parcelas	Equações	Observações
Reator UASB		
Carga DQO _{aplicada}	$DQO_{aplic} = Pop \times QPC_{DQO}$	DQO _{aplic} = Carga DQO afluyente (kgDQO.d ⁻¹) Pop = População contribuinte QPC _{DQO} = Contribuição per capita de DQO (kg.hab ⁻¹ .d ⁻¹)
Produção de lodo	$P_{lodo} = DQO_{aplic} \times Y_{lodo}$	P _{lodo} = Produção de lodo no reator UASB (kgSS.d ⁻¹) DQO _{aplic} = Carga DQO afluyente (kgDQO.d ⁻¹) Y _{lodo} = Coeficiente de produção de lodo (0,18 kgSS.kgDQO _{aplic} ⁻¹)
Vazão de lodo	$Q_{lodo} = \frac{P_{lodo}}{\left[\frac{C(\%)}{100} \right] \times \rho_{lodo}}$	Q _{lodo} = Vazão de lodo (m ³ .d ⁻¹) P _{lodo} = Produção de lodo (kgSS.d ⁻¹) C = Concentração de sólidos (%) ρ _{lodo} = Massa específica do lodo (kg.m ⁻³)
Unidades de desidratação		
Produção de lodo	$P_{lodo'} = \frac{E_{sólidos}}{100} \times P_{lodo}$	P _{lodo'} = Produção de sólidos efluente à unidade de desidratação (kgSS.d ⁻¹) E _{sólidos} = Captura de sólidos pela unidade de desidratação (%) P _{lodo} = Produção de lodo no reator UASB (kgSS.d ⁻¹)
Produção total de lodo	$P_{tot} = \frac{P_{lodo'}/F}{\left[\frac{C'(\%)}{100} \right]}$	P _{tot} = Produção total de lodo (kg ST.d ⁻¹) F = relação entre SV/ST P _{lodo'} = Produção de lodo efluente à unidade de desidratação (kgSS.d ⁻¹) C' = Concentração de sólidos no lodo desidratado (%).
Energia contida no lodo		
Potencial Calorífico Superior	$PCS_s = [337,3 \times C + 1.418,9 \times (H - O/8)] / 1.000$	PCS _s = Potencial calorífico superior (MJ.kg ⁻¹), b.s C = Teor de carbono (%), b.s H = Teor de hidrogênio (%), b.s O = Teor de oxigênio (%), b.s
Potencial Calorífico Inferior	$PCI_t = [(PCS_s - \lambda \times (r + 0,09 \times H_s)) \times (100 - W_t) / 100]$	PCI _t = Potencial calorífico inferior (MJ.kg ⁻¹), b.t PCS _s = Potencial calorífico superior (MJ.kg ⁻¹), b.s λ = calor latente da água (2,31 MJ.kg ⁻¹ a 25°C) r = Razão entre teor de umidade e teor de sólidos no lodo desidratado (-) H _s = Teor de hidrogênio (%), b.s W _t = Teor de sólidos no lodo desidratado (%)
Potencial energético do lodo	$PE_{lodo} = PCI_t \times P_{tot}$	PE _{lodo} = Potencial energético do lodo (MJ.d ⁻¹) PCI _t = Potencial calorífico inferior (MJ.kg ⁻¹), base de trabalho P _{tot} = Produção total de lodo (kg ST.d ⁻¹)
Potencial energético da ETE		
Potencial energético total da ETE	$PE_{Total} = PE_{lodo} + PE_{biogás}$	PE _{total} = Potencial energético total (MJ.d ⁻¹) PE _{lodo} = Potencial energético do lodo (MJ.d ⁻¹) PE _{biogás} = Potencial energético do biogás (MJ.d ⁻¹)

b.s: base seca, b.t: base de trabalho

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Potencial energético do biogás

A partir do modelo foram previstos o potencial energético do lodo e do biogás para ETEs com população contribuinte de até 1 milhão de habitantes. As Figuras 1 e 2 apresentam a produção estimada de biogás e o potencial energético do biogás para diferentes vazões contribuintes. A Figura 3 apresenta o potencial do biogás para população até 1 milhão de habitantes. Podem ser obtidos valores bastante dissonantes de produção de biogás e de potencial de geração de energia, a depender das variáveis de entrada.

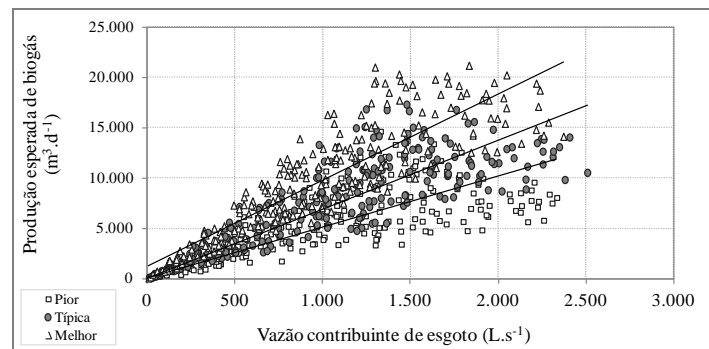


Figura 1: Estimativa da produção de biogás em reatores UASB tratando esgoto tipicamente doméstico em para vazão afluente de até 2.500 L.s⁻¹.

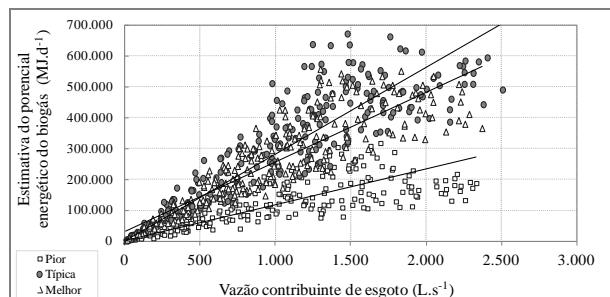


Figura 2: Estimativa do potencial energético do biogás em reatores UASB tratando esgoto para vazão afluente de até 2.500 L.s⁻¹.

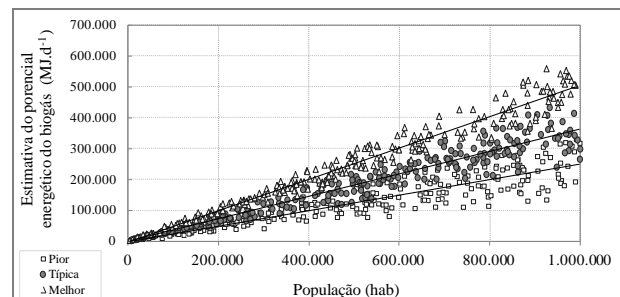


Figura 3: Estimativa do potencial energético do biogás em reatores UASB tratando esgoto para população de até 1 milhão de habitantes.

Potencial energético do lodo

A Figura 4 apresenta a estimativa do potencial energético do lodo desidratado em função da população para os três tipos de processos de desidratação: filtro prensa, leito de secagem e centrífuga.

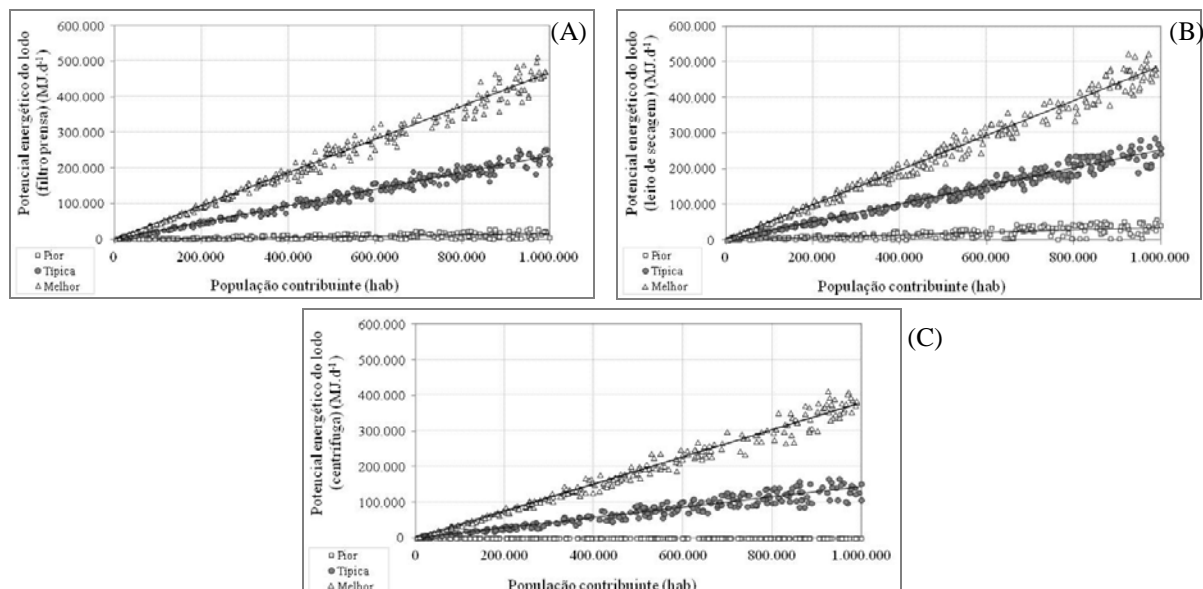


Figura 4: Estimativa do potencial energético do lodo em reatores UASB tratando esgoto doméstico após a desidratação em (a) filtro prensa (b) leito de secagem e (c) centrífuga.

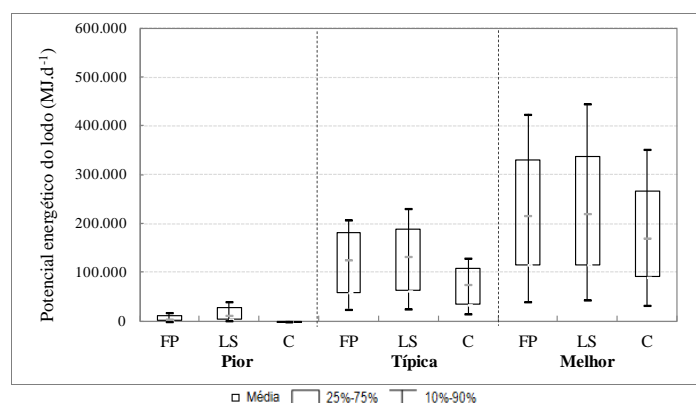
A Tabela 3 apresenta a estatística descritiva do potencial energético do lodo para as três alternativas estudadas. Observa-se que para a centrífuga o potencial de energia é inferior às outras unidades, devido à influência da umidade, influenciando negativamente a energia disponível contida no lodo desidratado. Para lodo com

propriedades compatíveis com a pior condição este cenário fica mais evidente. A figura 5 apresenta o gráfico box-plot com a variação do potencial energético do lodo desidratado considerando os diferentes cenários e unidades de desidratação, observa-se que as condições de geração de energia tornam-se semelhantes para as alternativas de filtro prensa e leito de secagem com a melhoria das características energéticas do lodo.

Tabela 3: Estatística descritiva do potencial de geração de energia do lodo, em MJ.d⁻¹, para diferentes cenários e unidades de desidratação.

Cenário	Pior			Típico			Melhor		
Unidade	FP	LS	C	FP	LS	C	FP	LS	C
Mín	0	24	0	1.478	1.664	986	1.331	1.343	1.171
Máx	31.049	54.745	0	253.045	284.967	166.493	513.767	522.397	412.399
Média	7.498	16.934	0	121.995	130.049	74.385	226.660	235.647	182.879

FP: Filtro prensa, LS: Leito de secagem, C: Centrifuga.



FP: Filtro prensa, LS: Leito de secagem, C: Centrifuga.

Figura 5: Box plot do potencial energético do lodo em função das características do lodo e das unidades de desidratação.

Potencial energético da ETE

Com o objetivo de avaliar o potencial energético dos subprodutos biogás e lodo para as simulações realizadas, apresenta-se na Figura 6 o potencial energético total para populações contribuintes até 1 milhão de habitantes, quando a desidratação é realizada por filtro prensa. Na figura 7, os dados do potencial energético total de ETEs são apresentados no gráfico box-plot a partir das características do lodo e das unidades de desidratação.

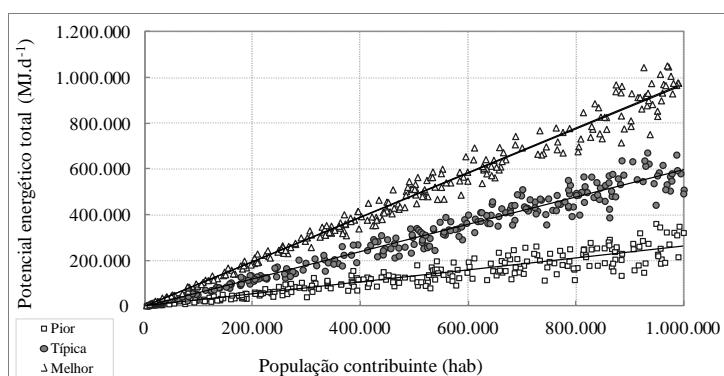


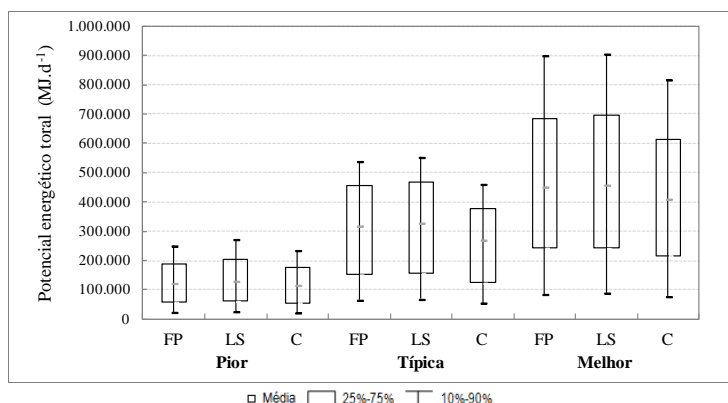
Figura 6: Potencial energético total de ETE, para população de até 1.000.000 habitantes, com o uso de filtro prensa como unidade de desidratação.

A Tabela 4 apresenta algumas relações que fazem referência ao potencial de geração de energia do biogás, lodo desidratado, considerando a média dos valores para ETEs com contribuição populacional de até 1.000.000 habitantes. Avalia-se que independentemente das propriedades do lodo desidratado, o biogás é o principal subproduto a ser aproveitado energeticamente em ETEs.

Tabela 4: Relações entre o potencial de geração de energia do biogás e lodo, para diferentes cenários e condições de desidratação.

Cenário	Pior			Típico			Melhor		
Relações	FP	LS	C	FP	LS	C	FP	LS	C
Potencial biogás/total (%)	0,94	0,88	1,00	0,60	0,59	0,72	0,52	0,51	0,57
Potencial lodo/total (%)	0,06	0,12	0,00	0,40	0,41	0,28	0,48	0,49	0,43
Potencial biogás/lodo (%)	37,75	14,18	-	1,54	1,45	2,57	1,07	1,03	1,33

FP: Filtro prensa, LS: Leito de secagem, C: Centrífuga.



FP: Filtro prensa, LS: Leito de secagem, C: Centrífuga.

Figura 7: Box plot do potencial energético total de ETEs em função das características do lodo e das unidades de desidratação.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos dados relacionados com a regressão linear para diversas relações estudadas. Observa-se que para as relações propostas o coeficiente de variação (R^2) é maior para situações mais favoráveis.

Tabela 5: Resumo com as informações sobre a regressão linear para diversas relações propostas.

Unidade	Relação	Cenário					
		Pior		Típico		Melhor	
		Equação	(R^2)	Equação	(R^2)	Equação	(R^2)
F.P	$L.s^{-1} \times m^3.d^{-1}$	$y = 7,253x$	0,2959	$y = 111,85x$	0,8593	$y = 217,96x + 22.403$	0,8753
	hab. x MWh.d ⁻¹	$y = 0,015x$	0,3555	$y = 0,2352x$	0,9766	$y = 0,4673x + 456,02$	0,9831
	$L.s^{-1} \times MWh.d^{-1}$	$y = 7,253x$	0,2959	$y = 111,85x$	0,8593	$y = 217,96x + 22.403$	0,8753
L.S	$L.s^{-1} \times m^3.d^{-1}$	$y = 16,857x$	0,4904	$y = 119,39x$	0,8516	$y = 226,67x + 23.222$	0,8721
	hab. x MWh.d ⁻¹	$y = 0,0347x$	0,5464	$y = 0,251x$	0,9656	$y = 0,4869x - 30,399$	0,9831
	$L.s^{-1} \times MWh.d^{-1}$	$y = 16,857x$	0,4904	$y = 119,39x$	0,8516	$y = 226,67x + 23.222$	0,8721
C	$L.s^{-1} \times m^3.d^{-1}$	$y=0$	-	$y = 67,949x$	0,7821	$y = 178,81x + 15.306$	0,8678
	hab. x MWh.d ⁻¹	$y=0$	-	$y = 0,1431x$	0,907	$y = 0,3846x - 3.304,8$	0,9809
	$L.s^{-1} \times MWh.d^{-1}$	$y=0$	-	$y = 67,949x$	0,7821	$y = 178,81x + 15.306$	0,8678

Validação do modelo - Reatores UASB ETE Laboreaux (Itabira/MG)

A validação do modelo para a estimativa da geração de biogás já foi demonstrada por Lobato (2011). Para o lodo, a validação será demonstrada com mais detalhes em trabalhos futuros, entretanto avaliou-se o ajuste dos dados de produção e potencial energético dos subprodutos lodo e biogás da ETE Laboreaux, a qual opera com filtro prensa como unidade de desidratação do lodo excedente. Os resultados reais para o potencial de geração de energia pelo lodo do filtro prensa foram plotados no mesmo gráfico onde aparecem as linhas de tendência dos resultados obtidos nas simulações (Figura 8).

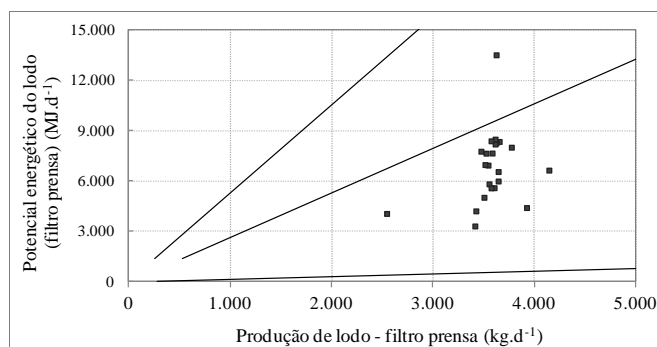


Figura 8: Validação do modelo a partir dos dados de monitoramento da ETE Laboreaux.

Observa-se que os resultados para a geração de lodo no filtro prensa e o consequente potencial de recuperação de energia, totalizando 26 dados medidos, obtidos a partir de dados de monitoramento, ficaram dentro das faixas simuladas, concentrando-se entre as faixas referentes as situações típica e pior.

A partir dos dados de monitoramento dos subprodutos da ETE Laboreaux (out.2010 a out.2011), Rosa *et al.* (2011) determinaram o potencial energético do lodo desidratado em filtro prensa (7.518 MJ.d^{-1}) e do biogás (10.962 MJ.d^{-1}) gerados nos oito reatores UASB. A Tabela 6 apresenta as principais relações unitárias a partir dos dados medidos e a comparação com os dados simulados pelo modelo. Observa-se que a ETE Laboreaux melhor se enquadra na situação típica proposta pelo modelo.

Tabela 6: Relações entre o potencial energético do biogás e do lodo para a ETE Laboreaux.

Relações unitárias	Valores			
	Pior	Típica	Melhor	Simulados
Potencial biogás/total (%)	0,94	0,06	37,75	0,59
Potencial lodo/total (%)	0,60	0,40	1,54	0,41
Potencial biogás/lodo (%)	37,75	1,54	1,07	1,46

CONCLUSÕES

A partir do aprimoramento do modelo matemático para a determinação da estimativa do potencial energético dos subprodutos lodo e biogás, conclui-se que:

- O modelo proposto apresenta indicativos favoráveis para sua aplicação como ferramenta na determinação do potencial energético de ETEs, através do uso do biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia.
- Há um indicativo que o modelo de Monte Carlo foi validado para a desidratação de lodo com o emprego de filtro prensa, entretanto a análise para um maior número de dados de entrada confirmará esta afirmativa.
- A modelagem matemática aplicada à estimativa do potencial energético do lodo e do biogás aponta o conhecimento do aproveitamento da energia contida nos subprodutos, corroborando para uma maior sustentabilidade das ETEs.
- Lodo proveniente de centrífuga não apresenta boas propriedades energéticas, devido à elevada presença de umidade.
- A possibilidade de geração de eletricidade e calor a partir do lodo e do biogás, para utilização na estação dependerá principalmente das eficiências, dos custos e dos requisitos de purificação dos equipamentos disponíveis no mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, C.V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds) Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001. 484 p., (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).
2. CHERNICHARO, C. A. L., ALMEIDA, P.G.S., LOBATO, L. C. S., COUTO, T. C. COUTO AND BORGES, J.M. (2009). Experience with the design and start up of two full-scale UASB plants in Brazil: enhancements and drawbacks. *Water Science and Technology*, 60 (2), 507-515.
3. COURTAUD, L.; PEREGRINA, C.; CREST, M.; SABLAYROLLES, M.L.; AUDIC, J.M.; ARLABOSSE, P. Alternative fuels derived from organic waste: the case of sewage sludge characterization as a potential energy source. In: 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY FROM BIOMASS AND WASTE, 2010, Venice, Italy. *Proceedings...* Italy, 2010.
4. DE SENA, R. F.; CLAUDINO, A.; MORETTI, K.; BONFANTI, I. C.; MOREIRA, R. F. P. M.; JOSÉ, H. J. Biofuel application of biomass obtained from a meat industry wastewater plant through the flotation process - A case study. *Resources Conservation and Recycling* (2007), doi:10.1016/j.resconrec.2007.07.002.
5. 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.
6. ROSA, A. P., LOBATO, L. C. S., BORGES, J. M., FONSECA, W. F., CHERNICHARO, C. A. L. (2011). "Estimativa do potencial energético de uma estação de tratamento de esgoto doméstico pelo uso dos subprodutos de reatores UASB: lodo excedente e biogás", *Anais do 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Vol. XI-017, Porto Alegre, Brasil.