

CAPÍTULO 1

Primeiro colocado na Categoria "Mestrado e Doutorado" do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis

APROVEITAMENTO DE BIOGÁS E LODO EXCEDENTE DE REATORES UASB COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

André Pereira Rosa^{1*}

Lívia Cristina da Silva Lobato²

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo³

¹ Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG

² Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG

³ Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG

* andrerosa@ufv.br

RESUMO

A pesquisa teve como objetivo avaliar o aproveitamento dos subprodutos biogás e lodo excedente de reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto. Os trabalhos foram conduzidos na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) *Laboreaux*, em Itabira – MG, através da caracterização do potencial energético do lodo e do biogás e com a proposta de determinação de balanços de massa e energia, além do cálculo das redu-

ções nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) por metodologia proposta pelo UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) para dois cenários que apresentam, em linhas gerais: 1– uso prioritário do biogás para a secagem do lodo, e 2 – uso prioritário do biogás para a geração de eletricidade. Por fim, propôs-se o uso de modelagem matemática para a estimativa do balanço energético em ETEs com o uso dos subprodutos como fonte de energia. No que se refere ao desenvolvimento do modelo matemático, os resultados indicam que o modelo permitiu uma estimativa realista da produção de lodo e do potencial energético total nas ETEs.

Palavras-Chave: biogás, recuperação de energia, lodo, tratamento de esgoto, reatores UASB.

INTRODUÇÃO

Contextualização e justificativa

Atualmente, os reatores UASB, empregados no tratamento de esgoto doméstico, já apresentam grande aplicação e certo estágio de maturidade tecnológica, em especial em países tropicais, com destaque para o Brasil. No entanto, apesar de suas vantagens, os reatores UASB apresentam ainda limitações não completamente solucionadas. Caso diretrizes adequadas para projeto, construção e operação não sejam disponibilizadas em curto espaço de tempo, a tecnologia pode ser desacreditada e sua aplicação reduzida (CHERNICHARO & STUETZ, 2008). De forma paralela, o emprego dos reatores UASB apresenta potenciais ainda não explorados em plenitude até o presente, como é o caso do aproveitamento energético conjunto do lodo e do biogás.

Diante deste contexto, observa-se uma nova área de pesquisa ainda a ser explorada com a recuperação energética do lodo, a qual pode ser atrelada com os estudos de aproveitamento do biogás para este mesmo fim, revelando inúmeras possibilidades de uso individual ou combinado, tendo como intuito a geração de energia ou calor em benefício da própria ETE, ou o repasse a terceiros. O desenvolvimento da recuperação energética dos principais subprodutos gerados em reatores UASB tem o potencial de conferir às estações maior independência energética e vantagens no âmbito ambiental, social e econômico.

A necessidade de avanços na recuperação energética do lodo e do biogás, atrelada ao seu representativo potencial energético e à constante produção nas ETEs, justifica os estudos que propõem o uso destes materiais como fonte de energia renovável. No Brasil, o lodo é geralmente encaminhado para aterro sanitário e o biogás queimado

em flare, gerando-se emissões de gases de efeito estufa. O biogás, em especial, ao ser empregado como fonte para a geração de eletricidade, contribuiria como fonte renovável na matriz energética.

Objetivos do trabalho

Este trabalho teve como objetivo propor o aproveitamento energético dos subprodutos (lodo e biogás) gerados em reatores UASB, a fim de demonstrar que estes podem constituir fonte de energia renovável para as ETEs. Dentro deste escopo, definem-se os seguintes objetivos específicos, a saber:

- Atestar as propriedades energéticas do lodo e do biogás como fonte de energia renovável em ETEs;
- Avaliar o potencial energético e de redução nas emissões de GEE pela proposta de uso do biogás e de lodo como fonte de energia: Estudo de caso da ETE *Laboreaux*, e;
- Propor o emprego de modelo matemático para a estimativa do balanço energético em ETEs operando com reatores UASB.

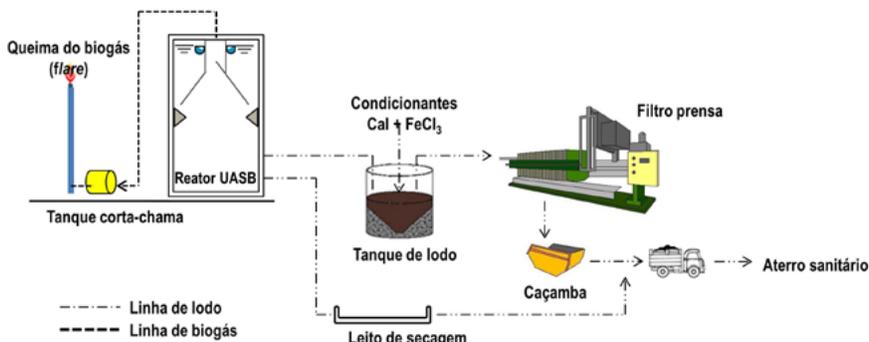
METODOLOGIA

Este trabalho foi organizado da seguinte forma: (i) estimativa do potencial energético do biogás e do lodo, determinação de cenários para seus usos, e o estudo da redução das emissões de GEE. Para tanto, a ETE *Laboreaux* (Itabira/ MG) foi utilizada como estudo de caso. Foi realizada a caracterização dos subprodutos para fins energéticos, assim como o emprego de metodologias do UNFCCC para a estimativa da redução das emissões de GEE, e balanços de massa e energia foram realizados para aprimorar as comparações dos cenários. (ii) Desenvolvimento de um modelo matemático com o uso da simulação de Monte Carlo, para a estimativa do balanço energético em ETEs operando com reatores UASB recebendo a contribuição de uma população de até um milhão de habitantes.

Estimativa do potencial energético e da redução das emissões de GEE pela proposta de uso do biogás e de lodo como fonte de energia: Estudo de caso da ETE *Laboreaux*.

A ETE *Laboreaux* apresenta fluxograma simplificado, compreendendo unidades de tratamento preliminar (gradeamento e desarenador), unidades de tratamento biológico anaeróbio e aeróbio em sequência (reator UASB, filtro biológico percolador – FBP e decantador secundário). A Figura 1 apresenta as etapas relacionadas com o gerenciamento do lodo e do biogás. O monitoramento da ETE (caracterização e quantificação dos subprodutos, assim como o cálculo da demanda energética da estação) ocorreu no período de outubro de 2010 a outubro de 2011.

Figura 1 – Fluxograma esquemático das etapas relacionadas com o sistema de gerenciamento do lodo e do biogás na ETE *Laboreaux*.



▪ Caracterização do lodo

O lodo foi quantificado pela pesagem do caminhão transportador após o carregamento de cada caçamba de estocagem do lodo desidratado, antes do envio para o aterro sanitário da cidade de Itabira. As análises realizadas foram: umidade, poder calorífico superior, composições elementar e imediata. Todas as análises foram realizadas em triplicata de acordo com procedimentos estabelecidos no *Standard Methods* (APHA/WEF, 2005) e NBR 8112 (ABNT, 1986). O poder calorífico superior real (PCS) do lodo, base seca (b.s.) foi determinado em laboratório com o uso de uma bomba calorimétrica adiabática. Os poderes caloríficos superior (PCS_s), base seca, e inferior (PCI_t), base de trabalho, teóricos, foram determinados de acordo com as equações propostas pela fórmula de Dulong e por Cortez *et al.* (2008).

▪ *Caracterização do biogás*

Nesse mesmo período, amostras de biogás foram coletadas em duplicata por meio de seringas plásticas equipadas com válvulas de três vias, em um ponto anterior ao queimador de gases.

▪ *Cálculo do balanço energético da ETE Laboreaux*

A demanda energética considera o consumo de eletricidade na estação para a manutenção das atividades de operação do sistema de tratamento. Para o período considerado, a demanda energética da ETE *Laboreaux* correspondeu a 1.586 kWh.d⁻¹ (5.709 MJ.d⁻¹). No que se refere à determinação do potencial energético¹ total dos subprodutos, o lodo desidratado em filtro prensa foi considerado inadequado para fins energéticos, devido ao excessivo conteúdo de umidade. A fim de viabilizar seu uso potencial como combustível, propõe-se sua secagem até a umidade de 10%.

▪ *Proposta integrada de aproveitamento energético de lodo e biogás*

Dois cenários de aproveitamento energético dos subprodutos foram considerados no presente estudo, conforme detalhamento na Figura 2. O software CHEM-CAD[®] foi utilizado como ferramenta para a simulação dos processos de combustão² (queima direta do biogás na câmara de combustão e no MCI), o qual foi subsídio para o cálculo dos balanços de massa e energia para ambos os cenários. Os mesmos cenários foram estudados na sequência da estimativa da redução de emissões de GEE, conforme descrito no item seguinte.

▪ *Quantificação da redução nas emissões de GEE pelo uso do biogás e lodo como biocombustível*

Esta etapa teve como objetivo apresentar e comparar a redução dos GEE para os dois cenários propostos de aproveitamento energético dos subprodutos lodo e biogás para a ETE *Laboreaux*³. As metodologias aplicadas para os cenários propostos foram (UNFCCC, 2011): AMS III-E – Geração de metano evitado pelo decaimento da biomassa através de processos de combustão, gaseificação e tratamento mecânico/térmico, versão 16.0, escopo setorial 13; AMS I-D – Geração de eletricidade renovável conectada à rede, versão 17, escopo setorial 01. A Figura 2 delimita a aplicação das metodologias dentro do fluxograma da ETE *Laboreaux*.

¹ A descrição do procedimento para o cálculo do potencial energético dos subprodutos é descrito em Rosa (2013).

² Um detalhamento maior sobre as características dos processos de queima é apresentado por Rosa (2013).

³ Atualmente, apenas projetos já registrados na UNFCCC estão em condições de gerar créditos de carbono que podem ser adquiridos na União Europeia, e em função disso os preços estão em níveis muito menores. No entanto, o Brasil assumiu compromissos de redução de suas emissões no Protocolo de Paris, assinado em 2015, e a Lei da Política Nacional de Mudanças do Clima prevê a criação do mercado de emissões reduzidas a nível nacional. As metodologias da UNFCCC têm servido de base para a quantificação de emissões reduzidas nos mercados nacionais.

Figura 2– Cenários para a recuperação energética dos subprodutos da ETE *Laboreaux*:
(a) cenário 1 e (b) cenário 2.

Figura 2-a

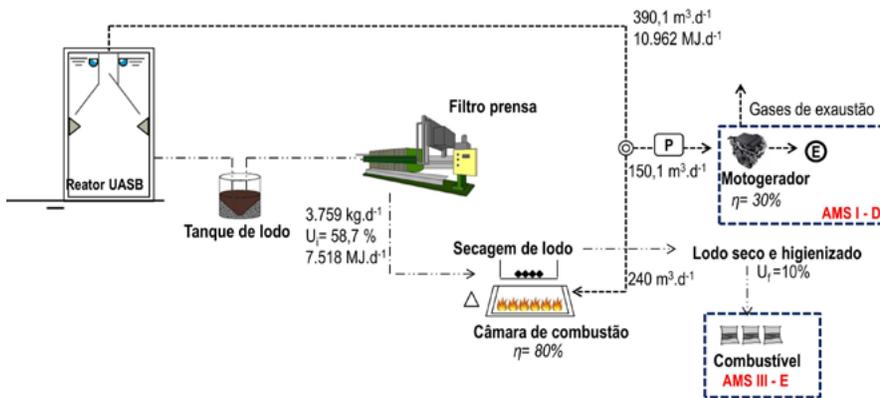
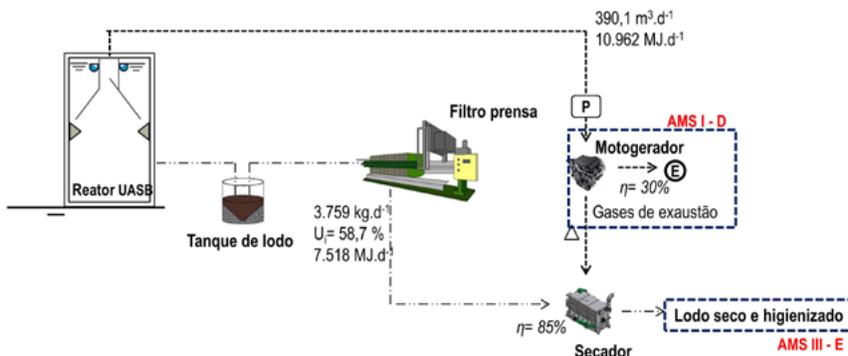


Figura 2-b



— · — · —	Linha de lodo	P	Purificação de biogás	E	Eletricidade	η	Eficiência de conversão
— — — —	Linha de biogás	Δ	Energia térmica	\odot	Detalhamento de alternativas	u	Umidade

Cenário 1: uso prioritário do biogás em câmara de combustão visando a geração de calor para a secagem térmica do lodo desidratado e o excedente de biogás para geração de eletricidade em motor de combustão interna (MCI).

Cenário 2: uso prioritário do biogás em MCI visando a geração de eletricidade e aproveitamento do calor dos gases de exaustão do motor para a secagem térmica de lodo.

Desenvolvimento de modelo matemático para a estimativa do balanço energético em ETEs operando com reatores UASB

O modelo matemático⁴, simulação de Monte Carlo, foi estruturado em uma planilha eletrônica. De maneira geral, o modelo matemático foi desenvolvido considerando três cenários que acarretam potenciais de recuperação dos subprodutos biogás e lodo excedente: (i) pior cenário; (ii) cenário típico e (iii) melhor cenário. O Quadro 1 descreve as principais características dos cenários.

Quadro 1 – Descrição das características do pior e melhor cenários para o modelo matemático (*) relativos ao lodo e biogás gerados em reatores UASB.

Cenário	Pior cenário	Melhor cenário
Aspectos relacionados ao biogás*	Sistemas operando com esgoto mais diluído. Maiores concentrações de sulfato. Menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano.	Sistemas operando com esgoto mais concentrados. Menores concentrações de sulfato. Maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano.
Aspectos relacionados ao lodo	Elevada presença de cinzas. Baixa concentração hidrogênio. Baixo teor de sólidos fixos.	Reduzida presença de cinzas. Elevada concentração de hidrogênio. Elevado teor de sólidos fixos.

^(*) Fonte: Lobato (2011).

Protocolo para o cálculo do balanço energético das ETEs

Para a estimativa do balanço energético de ETEs operando com reatores UASB, atendendo a uma contribuição de até um milhão de habitantes, foi realizada inicialmente a determinação do potencial energético dos subprodutos. Na sequência, foi estimado o consumo energético das ETEs em função do gasto energético para a operação de estações elevatórias de esgoto (EEE) com diferentes alturas manométricas e, por fim, feita a estimativa da produção líquida de eletricidade pelo uso do biogás como fonte de energia.

⁴ Rosa (2013) apresenta as características adotadas para lodo e biogás utilizados no modelo. A variabilidade nos dados foi incorporada à interpretação dos resultados do modelo, através da Análise da Incerteza, com a execução de um elevado número de simulações (250 simulações por cenário). Em cada corrida do modelo, é selecionado um conjunto diferente de valores gerados aleatoriamente e dentro de faixas pré-estabelecidas.

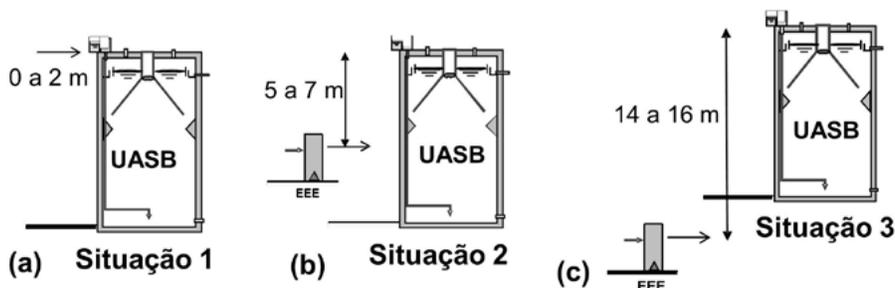
Estudo do potencial energético dos subprodutos biogás e lodo

O potencial de recuperação energético do biogás seguiu metodologia descrita por Lobato (2011). A estimativa da produção de lodo para centrífuga, filtro-prensa e leito de secagem foi determinada de acordo com Chernicharo (2009). O estudo do potencial energético do lodo foi realizado como detalhado por Rosa (2013).

Estimativa do consumo energético e produção líquida de eletricidade para as ETEs

Considerou-se que a principal parcela envolvida com a energia elétrica demandada (consumida) pelas ETEs se refere ao gasto energético para o bombeamento do esgoto nas ETEs. A estimativa do consumo energético nas ETEs foi realizada considerando-se a seguinte classificação, conforme detalhado na Figura 3.

Figura 3 –Diferentes cenários estudados para a determinação do consumo energético em ETEs variando-se a altura de bombeamento de esgoto: (a) 0 a 2 m; (b) 5 a 7 m; (c) 14 a 16 m.



Aproveitamento energético do lodo e do biogás: um estudo de caso para as ETEs da Sanepar

Em adição, algumas considerações foram feitas sobre as 213 ETEs com reatores UASB operadas pela Sanepar (PR)⁵ com o intuito de demonstrar a aplicação e a capacidade de replicação da pesquisa. A partir da vazão de projeto de esgoto ($L \cdot s^{-1}$), determinou-se para o biogás sua produção esperada ($m^3 \cdot d^{-1}$) e seu potencial energético ($MJ \cdot d^{-1}$) e, para o lodo, a estimativa do potencial energético ($MJ \cdot d^{-1}$) disponível para as ETEs. No estudo referente ao lodo, considerou-se que a desidratação do lodo ocorre nas ETEs por leitos de secagem (vazão de projeto $< 45 L \cdot s^{-1}$) e com uso de centrífuga (vazão de projeto $\geq 45 L \cdot s^{-1}$).

⁵ Os dados de operação das ETEs já foram utilizados pelo professor orientador deste trabalho em estudos anteriores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estimativa do potencial energético e da redução das emissões de GEE pela proposta de uso do biogás e de lodo como fonte de energia: Estudo de caso da ETE *Laboreaux*

Potencial energético dos subprodutos

No período de monitoramento, a vazão de esgoto afluyente à estação apresentou um valor médio de $6.751 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ($78 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$) e a produção volumétrica de biogás gerado nos reatores UASB teve valor médio de $390,1 \text{ Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. A composição média de biogás nesse mesmo período foi de 78,2 % de CH_4 , 6,7 % de CO_2 e uma mistura de outros constituintes de 15,1 %. A partir das características do biogás, estima-se um potencial de energia da ordem de $10.962 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ ($28 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$ de metano e produção de $390,1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$). A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva para a caracterização do lodo gerado na unidade de desaguamento por filtro prensa na ETE *Laboreaux*. Identifica-se um potencial energético do lodo da ordem de $7.518 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ a partir do material com umidade de 58,7% (PCI_t real de $1,9 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ e geração de $3.759 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$).

Tabela 1 – Estatística descritiva dos resultados de caracterização do lodo desidratado gerado na ETE *Laboreaux*.

Estatística			Média	Nº dados	Mediana	σ
Composição imediata	% em massa (b.s)	Voláteis	42,9	31	43,7	4,0
		Cinzas	53,3	31	53,3	3,1
		Fixos	3,8	31	3,6	1,9
Umidade	%		58,7	29	58,2	5,9
Poder calorífico ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Teórico	PCS (b.s)	7,4	27	7,4	0,9
		PCI (b.t)	1,7	27	1,5	1,4
	Real	PCS (b.s)	8,7	26	8,6	1,2
		PCI (b.t)	2,0	24	1,9	0,8
Composição elementar, % em massa (b.s)		C	19,8	19	19,6	1,6
		H	3,6	19	3,5	0,3
		N	2,1	19	2,0	0,5
		O*	20,5	19	20,0	2,0
		Cinzas**	54	19	53,9	3,2

Nota: b.s: base seca, b.t: base de trabalho, PCS (poder calorífico superior), PCI (poder calorífico inferior), σ (desvio padrão em relação ao valor médio). *Determinado por diferença. **Considerados os dados medidos de cinzas para os dias que em houve caracterização de composição elementar.

Análise comparativa das alternativas de aproveitamento energético dos subprodutos e redução de GEE

As Figuras 4 e 5 apresentam os balanços de massa e energia para os cenários 1⁶ e 2, respectivamente.

Figura 4 – Balanço de massa e energia para o aproveitamento energético do biogás para a secagem térmica do lodo desidratado na ETE *Laboreaux* – Cenário 1.

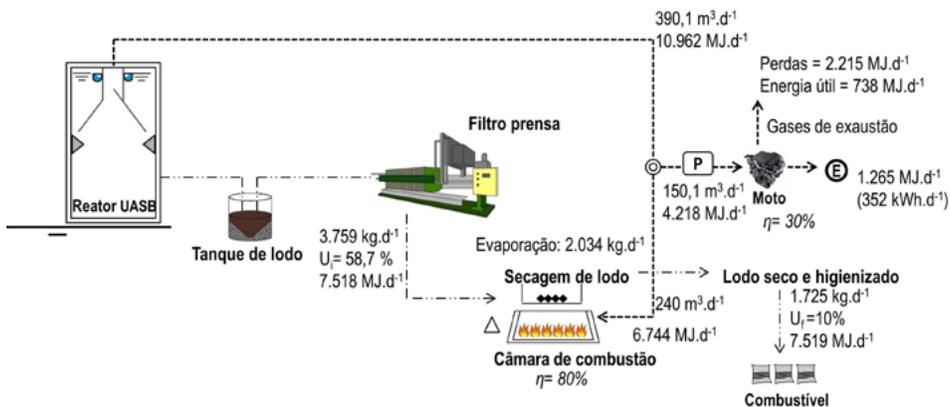
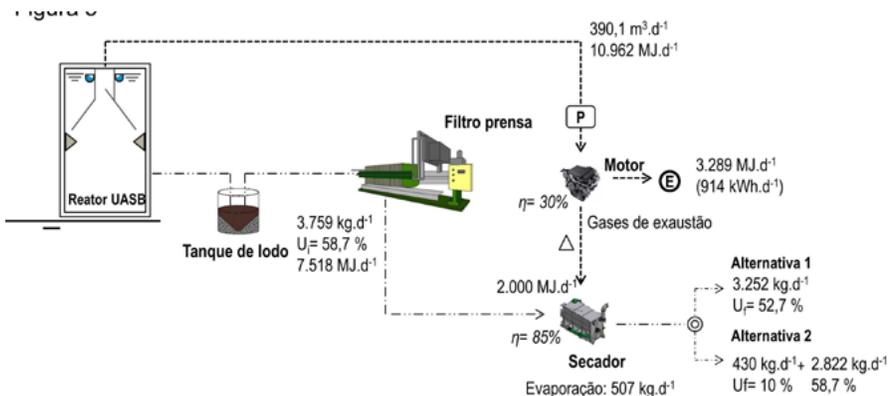


Figura 5 – Balanço de massa e energia para o aproveitamento energético do biogás para a geração de eletricidade seguida de secagem térmica do lodo com os gases de exaustão na ETE *Laoreaux* – Cenário 2.



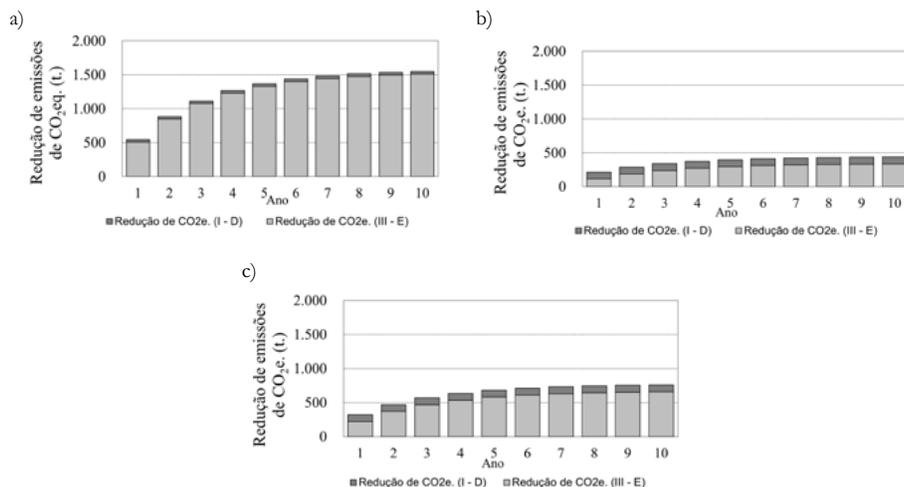
Alternativa 1: secagem térmica de todo lodo desidratado até uma umidade final mínima possível..

Alternativa 2: secagem térmica de fração do lodo até uma umidade final de 10% e o envio do restante do material desidratado (umidade de 58,7%) para aterro sanitário.

⁶ O detalhamento completo dos balanços de massa e energia para os cenários 1 e 2 são apresentados e discutidos por Rosa (2013).

A Figura 6a, 6b e 6c apresenta as reduções acumuladas das emissões de GEE (t.CO₂e.⁷) a partir da aplicação das metodologias III-E e I-D para os cenários 1, 2-a e 2-b, respectivamente.

Figura 6 - Redução das emissões de GEE (t.CO₂e): cenário 1 (a), cenário 2-a (b) e cenário 2-b (c).



A Tabela 2 apresenta um resumo dos benefícios econômicos que a empresa de saneamento teria obtido caso tivesse submetido o projeto de redução das emissões de gases de efeito estufa ao mercado de créditos de carbono, além de outras características dos cenários.

Tabela 2 –Resumo das características dos cenários e o ganho bruto caso o projeto tivesse sido submetido ao mercado de créditos de carbono para a ETE *Laboreaux*.

Cenário	1	2-a	2-b
Lodo não enviado para o aterro (t.ano ⁻¹)	1.372	1.187	1.030
Redução de lodo para o aterro (%)	100	86	75
Oferta de eletricidade ³	kWh.d ⁻¹	352	914
	%	22	57,6
Crédito de carbono (t. CO ₂ e.) ¹	12.691	3.741	6.392
Ganho bruto (US\$) ^{1,2}	133.111	39.239	67.044

Notas: 1para um período de 10 anos. 2cotação do dólar em 27/09/2013. 3produção de eletricidade para ambos os cenários e a porcentagem de fornecimento de eletricidade a partir de uma demanda da ETE *Laboreaux* de 1,586 kWh.d-1.

⁷ t.CO₂e. – toneladas de CO₂ equivalente é a unidade padrão e considera todas as emissões de gases de efeito estufa em uma mesma base (CO₂e)

Em adição, os resultados demonstram que o cenário 1 apresentou uma melhor performance na secagem e na conversão do lodo em subproduto energético e pode eliminar completamente a geração de rejeitos a serem dispostos no aterro sanitário. Em contrapartida, o potencial de geração de eletricidade é muito inferior, suficiente para atender apenas 22% da demanda da ETE.

Desenvolvimento de modelo matemático para a estimativa do balanço energético em ETEs operando com reatores UASB

A partir do modelo, foi previsto o potencial energético dos subprodutos para ETEs com população contribuinte de até um milhão de habitantes. A Figura 7 apresenta a produção estimada de biogás e o potencial energético do biogás em função de diferentes vazões contribuintes. A Tabela 3 apresenta um resumo dos dados relacionados com a regressão linear da Figura 7. A Tabela 4 apresenta informações sobre a regressão linear que relaciona o potencial de geração de energia pelo uso do lodo a partir da vazão efluente e da população contribuinte, para desidratação por filtro prensa, centrífuga e leitos de secagem.

Figura 7 – Estimativa da produção de biogás e do potencial energético do biogás em reatores UASB tratando esgoto tipicamente doméstico em função de vazão afluente de até 2.500L.s⁻¹

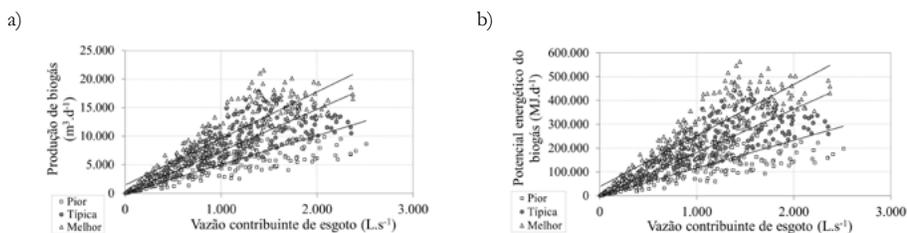


Tabela 3 – Resumo com as informações sobre a regressão linear para diversas relações propostas. Eixo x (parâmetros de projeto) e Eixo y (considerações acerca do biogás).

Relação (x,y)		L.s ⁻¹ x m ³ .d ⁻¹	L.s ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	hab. x MJ.d ⁻¹
Cenário Pior	Equação	y = 5,05x	y = 116,37x	y = 0,259x
	R ²	0,52	0,52	0,84
Cenário Típico	Equação	y = 7,36x	y = 181,74x	y = 0,37x
	R ²	0,67	0,7	0,93
Cenário Melhor	Equação	y = 8,16x + 1.460	y = 214,68x + 38.417	y = 0,49x - 470,29
	R ²	0,78	0,78	0,96

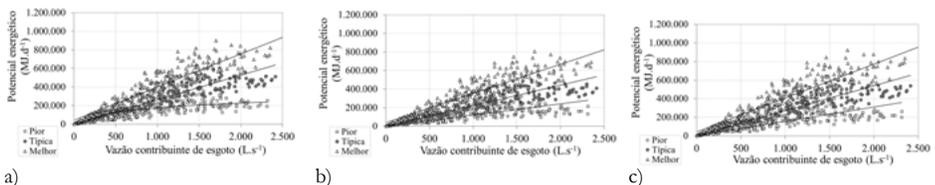
Tabela 4 – Resumo com as informações para a determinação do potencial energético do lodo (MJ.d⁻¹) – eixo y, a partir de dados de vazão e população contribuinte, para diferentes formas de desidratação.

Unidade		Filtro Prensa		Centrífuga		Leitos de secagem	
Relação (x,y)		L.s ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	hab x MJ.d ⁻¹	L.s ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	hab x MJ.d ⁻¹	L.s ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	hab x MJ.d ⁻¹
Cenário Pior	Equação	y = 25,83x	y = 0,05x	y = 0	y = 0	y = 34,26x	y = 0,07x + 990
	R ²	0,72	0,83	-	-	0,72	0,82
Cenário Típico	Equação	y = 94x	y = 0,19x	y = 50,18x	y = 0,10x	y = 103,08x	y = 0,21x + 594,30
	R ²	0,87	0,98	0,76	0,88	0,85	0,96
Cenário Melhor	Equação	y = 140,0x + 18.962	y = 0,32x + 60,36	y = 100,4x + 2.736	y = 0,22x - 06,41	y = 146,88x + 0341	y = 0,33x + 61,17
	R ²	0,86	0,98	0,84	0,96	0,85	0,97

Potencial energético global dos subprodutos da ETE

A Figura 8 apresenta o potencial energético para ETEs com desidratação do lodo por filtro prensa, centrífuga e leito de secagem, respectivamente⁸. A Tabela 5 apresenta a regressão linear do potencial energético total da ETE (MJ.d⁻¹) em função da vazão afluyente (L.s⁻¹), para as diferentes tecnologias de desidratação. A Tabela 6 apresenta os dados de regressão linear para a produção de energia disponível às ETEs em função da vazão afluyente para diferentes faixas de alturas manométricas.

Figura 8 - Potencial energético total (lodo e biogás) de ETEs com até 1.000.000 habitantes com o uso de (a) filtro prensa; (b) centrífuga; (c) leito de secagem.



⁸ A validação do modelo para a geração e o potencial energético do lodo foi realizada por Rosa (2013) a partir de dados reais das ETEs de Nova Contagem (MG) e Itabira (MG), nas quais a desidratação do lodo proveniente dos reatores UASB ocorre por centrífuga e filtro-prensa, respectivamente. Da mesma forma, o modelo foi validado por Lobato (2011) para a produção e o potencial de biogás para ETEs de diferentes portes.

Tabela 5 - Regressão linear para o potencial energético total da ETE (MJ.d⁻¹) - eixo y, em função da vazão contribuinte (L.s⁻¹) – eixo x, para as diferentes alternativas de desidratação.

Unidade		Filtro Prensa	Centrífuga	Leito de Secagem
Cenário Pior	Equação	$y = 120,69x$	$y = 73.771\ln(x) - 332.727$	$y = 154,62x$
	(R ²)	0,45	0,56	0,52
Cenário Típico	Equação	$y = 220,70x$	$y = 263,55x$	$y = 270,16x$
	(R ²)	0,72	0,76	0,76
Cenário Melhor	Equação	$y = 313,93x + 39.751$	$y = 356,95x + 42.367$	$y = 364,68x + 43.013$
	(R ²)	0,85	0,86	0,86

Tabela 6 - Resumo com as informações sobre a regressão linear para diferentes faixas de alturas entre a vazão de esgoto (L.s⁻¹) – eixo x, e a energia disponível para as ETEs (kWh.d⁻¹) - eixo y.

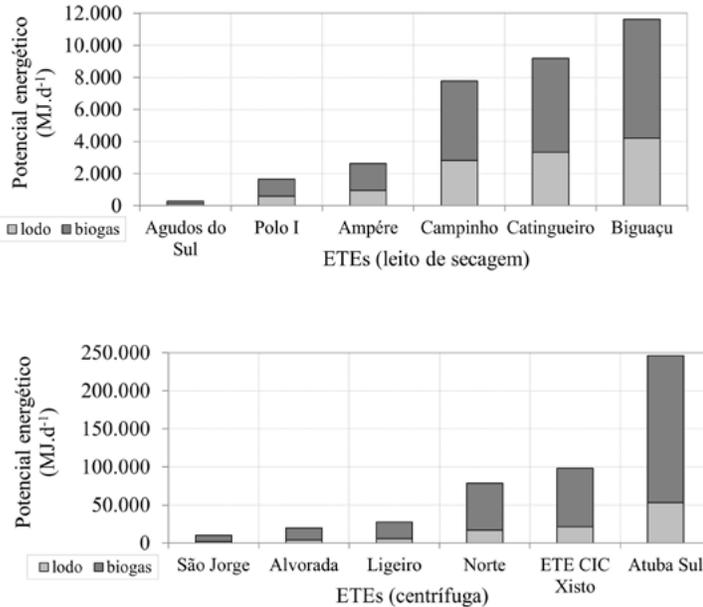
Faixas de alturas manométricas		0 a 2 m	5 a 7 m	14 a 16 m
Cenário Pior	Equação	$y = 9,65x$	$y = 7,68x$	$y = 4,22x$
	R ²	0,42	0,26	-0,02
Cenário Típico	Equação	$y = 13,86x$	$y = 11,92x$	$y = 8,37x$
	R ²	0,68	0,59	0,35
Cenário Melhor	Equação	$y = 19,36x$	$y = 17,37x$	$y = 13,77x$
	R ²	0,81	0,78	0,66

Estudo de caso das ETEs da Sanepar

Com o intuito de demonstrar a relevância do trabalho e seu potencial de replicação, a equação que representa, para um cenário típico, a relação entre a vazão contribuinte de esgoto (L.s⁻¹) – eixo x, versus produção esperada de biogás (m³.d⁻¹) – eixo y, para as 213 ETEs que operaram com reatores UASB na Sanepar é $y=7,3576x$. Para a relação entre a vazão contribuinte de esgoto (L.s⁻¹) versus o potencial de recuperação de biogás (MJ.d⁻¹), a relação correspondeu a $y=206,03x$. A predição foi realizada para as ETEs da Sanepar e as equações estão em convergência com o modelo estudado (conforme indicado na Tabela 3). Para fins ilustrativos, a Figura 9 apresenta a estimativa do potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás) para algumas das ETEs da Sanepar em função das alternativas de desidratação do lodo (leito de secagem e centrífuga) a partir das premissas especificadas na metodologia. Os dados foram gerados a partir das Tabelas 3 e 4, considerando-se o cenário típico. A relação adimensional entre o potencial energético do biogás/lodo foi de 1,76

e 3,62 para as ETEs da Sanepar que fazem uso de leitos de secagem e centrífuga, respectivamente.

Figura 9 – Estimativa do potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás) em reatores UASB para ETEs da Sanepar operando por (a) leito de secagem e (b)



CONCLUSÕES

Verificou-se o potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás), os quais podem ser empregados como fonte de energia renovável em ETEs, agregando benefícios ambientais. O biogás apresentou maior potencial de geração de energia, enquanto que a simples secagem do lodo já confere vantagens no que se refere ao transporte e à destinação desse elemento, mesmo que não seja utilizado com fins energéticos.

A caracterização sistemática da produção e do poder calorífico do biogás e do lodo produzidos na ETE Laboreaux possibilitou o desenvolvimento de balanços de massa e de energia que demonstraram o potencial de aproveitamento desses subprodutos do tratamento como fonte de energia renovável. Em adição, o aproveitamento energético dos subprodutos pode contribuir significativamente com a redução de GEE e trazer, além dos benefícios ambientais, vantagens econômicas.

O modelo proposto é uma ferramenta viável para se determinar o potencial energético do lodo e do biogás, o que favorece a tomada de decisão e o estudo de potencialidade de emprego dos subprodutos em benefício das ETEs. Além disso, pode ser facilmente aplicado em outros estudos de caso, como demonstrado para a Sanepar.

REFERÊNCIAS

- CHERNICHARO, C.A.L.; STUETZ, R.M. Energy Recover from Biogas *in* Anaerobic Wastewater Treatment Plants.2008. *In*: CHERNICHARO, C.A.L. *Limitações e Possíveis Melhorias Futuras no Projeto, na Construção e na Operação de Reatores UASB Tratando Esgotos Domésticos*. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2009. Relatório final de atividades do pós-doutorado.
- CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).
- CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. Biomassa para energia. Campinas: Editora Unicamp, 2008.
- 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.
- ROSA, A. P. Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em Estações de Tratamento de Esgoto tratando esgoto doméstico. 2013. 172 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change.2011. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/methodologies>. Acesso em 14 jan. 2013.