



II-294 - APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTOS DOMÉSTICOS: ESTUDO DE CASO ETE LABOREAUX – ITABIRA MG

Livia Cristina da Silva Lobato

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

Carlos A. L. Chernicharo⁽¹⁾

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.

Gilberto Caldeira Bandeira de Melo

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

Jorge Martins Borges

Engenheiro Mecânico. Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFMG. Diretor Técnico do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Itabira - MG

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Av. do Contorno, nº 842, 7º andar - Centro - Belo Horizonte - MG - Brasil - CEP 30110-060 - Tel: (31)3238-1020. email:calemos@desa.ufmg.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as principais alternativas para o aproveitamento energético do biogás gerado nos reatores UASB da estação de tratamento de esgotos da cidade de Itabira-MG (ETE Laboreaux), sobretudo aquelas relacionadas à secagem térmica e higienização do lodo e à geração de energia elétrica. A ETE Laboreaux opera atualmente com uma vazão afluyente média igual a 70 L/s. Para essa vazão, a produção média de biogás nos reatores UASB é igual a 534 m³/d, o que corresponde a um potencial de geração de energia igual a 3.423 kWh/d, que é superior à demanda energética das elevatórias do sistema. Os resultados encontrados para o balanço de energia na ETE Laboreaux demonstraram a viabilidade de se utilizar o potencial energético do biogás.

PALAVRAS-CHAVE: reatores UASB, biogás, lodo excedente, energia elétrica, secagem térmica

INTRODUÇÃO

Uma profunda discussão sobre a evolução e aplicabilidade da tecnologia anaeróbia para o tratamento de esgotos domésticos é apresentada em Lettinga *et al.* (1993), Foresti (2002) e von Sperling & Chernicharo (2005), onde são destacadas as diversas características favoráveis dos processos anaeróbios, como o baixo custo, simplicidade operacional e baixa produção de sólidos. Estas vantagens, aliadas às condições ambientais favoráveis dos países de clima quente, onde há a predominância de elevadas temperaturas durante praticamente todo o ano, têm contribuído para a colocação dos sistemas anaeróbios em posição de destaque, particularmente os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (reatores UASB). No entanto, em que pese suas grandes vantagens e ampla utilização no Brasil, os reatores anaeróbios ainda apresentam algumas limitações, não completamente solucionadas até o presente. Algumas destas limitações referem-se a dois subprodutos dos reatores anaeróbios, quais sejam: lodo excedente (presença de patógenos e desaguamento) e biogás (alternativas de tratamento e recuperação de energia).

O gerenciamento do lodo é uma atividade de grande complexidade e alto custo, que se for mal executada pode comprometer parcialmente os benefícios ambientais e sanitários de todo o sistema de esgotamento sanitário. No entanto, essa atividade tem sido negligenciada em nosso país. É muito comum que os projetos de estações de tratamento de esgotos omitam o tema da gestão do lodo, fazendo com que esta complexa atividade seja realizada sem planejamento pelos operadores das estações, muitas vezes em condições emergenciais.

Nos reatores UASB, a acumulação de lodo (biomassa) se dá após alguns meses de operação contínua. O descarte do lodo excedente deve ser feito periodicamente, caso contrário seu acúmulo no interior do reator



provocará uma perda excessiva de sólidos para o compartimento de decantação e, posteriormente, juntamente com o efluente líquido.

O volume de lodo gerado em uma estação de tratamento de esgotos representa aproximadamente 1% a 2% do volume de esgoto tratado, porém o custo do tratamento e disposição final desse subproduto pode atingir 20% a 60% do custo operacional da estação de tratamento. (ANDREOLI *et al.*, 2001)

O lodo descartado dos reatores UASB, embora produzido em menores quantidades e com maior grau de estabilização, quando comparado aos sistemas aeróbios de tratamento, ainda necessita das etapas de desidratação e, eventualmente, de higienização em caso de reúso. A desidratação objetiva a redução do volume e, conseqüentemente, dos custos com transporte e disposição final. Estes custos estão intrinsecamente ligados ao teor de sólidos do lodo, já que quanto maior esse teor, menor o volume de lodo a ser transportado.

Os processos de desidratação podem ser classificados em mecanizados e naturais. Os processos naturais são simples e requerem poucos investimentos, mas em contrapartida demandam grandes áreas e têm a eficiência intrinsecamente dependente das condições climáticas. Os processos mecanizados necessitam de pequenas áreas e têm capacidade de processar grandes volumes de lodo. Porém, os custos de implantação, operação e manutenção, associadas à complexidade operacional, geralmente inviabilizam seu emprego em pequenas comunidades. No Brasil, os principais processos utilizados para a desidratação natural são os leitos de secagem e para a desidratação mecânica, os filtros-prensa e as centrífugas.

Uma questão que deve ser considerada no gerenciamento do lodo é o fato de que alguns componentes das águas residuárias, ao passarem pelo sistema de tratamento, concentram-se em proporções variáveis no lodo. Vários componentes orgânicos e minerais conferem características fertilizantes ao lodo. Da mesma forma, outros componentes, pelo seu risco sanitário e ambiental, são indesejáveis, como por exemplo, metais, poluentes orgânicos variados e os microrganismos patogênicos. O esgoto exclusivamente residencial apresenta baixos teores de metais pesados, o que não implica em qualquer risco sanitário ou ambiental. Já a presença de contaminantes químicos está diretamente ligada ao recebimento de efluentes industriais na rede coletora. Desta forma, o principal problema com o lodo oriundo de estações que tratam esgotos tipicamente domésticos é a questão dos patógenos.

As tendências atuais para o gerenciamento do lodo incluem a utilização segura de nutrientes e matéria orgânica na agricultura, a redução dos custos energéticos e a desinfecção do lodo. Embora mais exigentes, as agências ambientais têm incentivado o emprego agrícola do lodo, devendo para isso apresentar características adequadas a esta finalidade. Uma destas exigências trata-se da higienização do lodo, de forma a reduzir a quantidade de microrganismos patogênicos a níveis aceitáveis. Para alcançar esse objetivo, têm-se aplicado a higienização com cal (caleação) ou a higienização térmica. Embora as dosagens de cal, os equipamentos de mistura e os períodos de maturação já estejam bem estabelecidos no caso da utilização de cal, os procedimentos e as análises de custos para a secagem e higienização térmica se encontram apenas parcialmente estabelecidos.

A secagem térmica do lodo promove a redução da umidade através da evaporação da água e a destruição dos organismos patogênicos, sendo que apenas a água é removida e os sólidos totais são mantidos praticamente inalterados. A preservação da matéria orgânica, associada à eliminação dos organismos patogênicos, constitui-se em um aspecto de fundamental importância quando o lodo (biossólido) vai ser utilizado na agricultura. Os principais benefícios da secagem térmica do lodo são:

- Redução significativa no volume de lodo.
- Redução no custo de transporte e estocagem.
- Produto estabilizado facilmente estocado, manuseado e transportado.
- Produto final praticamente livre de patógenos.
- Preservação das propriedades agrícolas do lodo.
- Não necessita equipamento especial para ser utilizado na agricultura.
- Produto pode ser ensacado e distribuído pelo comércio varejista.

Destaca-se que o consumo de combustível é o principal componente operacional dos sistemas de secagem térmica, sendo que a utilização de fontes alternativas de combustível, como o biogás oriundo de reatores UASB, pode promover uma considerável redução nos custos operacionais.



O biogás é uma mistura gasosa contendo metano (50 a 70%), gás carbônico (30 a 50%) e pequenas quantidades de sulfeto de hidrogênio e amônia. Concentrações traço de hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono e outros elementos podem eventualmente estar presentes no biogás (Meulepas, et al., 2005). A Tabela 1 apresenta a composição típica de biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos.

Tabela 1: Composição típica de biogás gerado em reatores UASB

Processo	H ₂ S (ppmv)	CO ₂ (%)	N ₂ (%)	CH ₄ (%)
Reatores anaeróbios tratando esgotos domésticos	0,1 a 0,5	5 a 15	10 a 25*	60 a 85

(*) a elevada fração de nitrogênio no biogás de reatores anaeróbios deve-se ao N₂ dissolvido no esgoto doméstico

Fonte: Adaptado de (Barbosa and Stuetz, 2005) e (Noyola, *et al.*, 2006)

O gás metano é considerado o mais importante gás de efeito estufa (GEE) emitido durante o tratamento de efluentes domésticos e industriais. Segundo Mulder (2001), a emissão global de metano está estimada em 500 milhões de toneladas por ano, sendo que os sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto contribuem com cerca de 5 % deste total, ou seja, cerca de 25 milhões de toneladas. O CH₄, quando comparado ao CO₂, apresenta um efeito de aquecimento 21 vezes maior.

Se por um lado o gás metano emitido para a atmosfera contribui de maneira significativa para o aumento do potencia de aquecimento global, por outro, se esse for coletado e utilizado para recuperação de energia, isso terá um efeito positivo em termos de redução de emissões de GEE, uma vez que esta energia renovável pode substituir a queima de combustíveis fósseis. Embora bastante praticada em alguns países, a recuperação de energia a partir do biogás encontra-se ainda nos primeiros estágios no Brasil. A grande maioria das estações de tratamento anaeróbio de efluentes e de aterros sanitários simplesmente queima o biogás, com o intuito de reduzir os impactos ambientais.

O poder calorífico do biogás, com um percentual de cerca de 60% de metano, é de aproximadamente 21,5 MJ/m³ (6,0 kW/m³ ou 5134 Kcal/m³), correspondendo a cerca de 55% daquele oferecido pelo gás natural (39 MJ/m³ ou 10,8 kW/m³ ou 9313 Kcal/m³). Esses valores demonstram a importância de se aproveitar esse potencial energético como fonte de energia limpa e renovável, em consonância com o conceito de desenvolvimento sustentável, onde, cada vez mais, procuram-se tecnologias que aliem desenvolvimento e preservação do meio ambiente.

Algumas possibilidades de uso biogás para produção de energia incluem:

- **Uso direto:** esse é o método mais simples e usualmente de melhor relação benefício/custo para se utilizar o biogás. Trata-se do seu uso como um combustível de potencial energético médio, em aquecedores ou processos industriais, em substituição a outros combustíveis (gás natural, carvão ou óleo combustível). Alguns usos potenciais incluem aquecedores, secadores, fornos e estufas, sendo mais recentemente também utilizado para a queima em fornos para fabricação de peças cerâmicas e de vidro, o aquecimento de água para fins de piscicultura e a evaporação de lixiviado (chorume). Para esses usos, o tratamento do biogás é simples, usualmente consistindo da remoção parcial de condensado e filtração para remoção de impurezas particuladas. O biogás é canalizado diretamente até o consumidor, onde é utilizado nos equipamentos de combustão, em substituição ou em complementação ao combustível utilizado anteriormente. Algumas modificações nos equipamentos originais podem ser necessárias, mas usualmente de menor complexidade.
- **Geração de eletricidade:** a geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia pode ser feita utilizando-se uma variedade de tecnologias, incluindo motores de combustão interna, turbinas e micro-turbinas.
- **Co-geração:** a co-geração possibilita a geração conjunta de eletricidade e de energia térmica, esta última usualmente na forma de vapor ou água quente. O ganho de eficiência conseguido com o aproveitamento da energia térmica, em complementação à geração de eletricidade, pode tornar essa alternativa bastante atrativa.
- **Combustíveis alternativos:** o biogás também pode ser utilizado para a geração de outras formas de energia, notadamente visando à injeção na linha de gás natural ou o aproveitamento como combustível veicular. Todavia, para esses fins, o nível e o custo do tratamento do biogás são bem mais elevados.

No caso particular do Brasil, com o grande incremento que vem se verificando na implantação de reatores e biodigestores anaeróbios para o tratamento de esgotos domésticos, de efluentes industriais e de dejetos animais, é possível antever que a recuperação e o uso direto do biogás poderão ser bastante incrementados no futuro. Além das possibilidades de uso apresentadas anteriormente, originadas da experiência com o aproveitamento de biogás gerado em aterros sanitários, pode-se elencar outros possíveis usos, a exemplo da secagem térmica de lodos, da geração de vapor para uso em pequenas indústrias (ex. agroindústrias), da geração de eletricidade para uso local (ex.: iluminação, equipamentos eletromecânicos), da cocção de alimentos (ex.: biogás suprido diretamente para a população no entorno) etc.

Diante do exposto, insere-se o presente trabalho, que tem como objetivo avaliar as principais alternativas para o aproveitamento energético do biogás gerado nos reatores UASB da estação de tratamento de esgotos da cidade de Itabira-MG (ETE Laboreaux), sobretudo aquelas relacionadas à secagem térmica e higienização do lodo e à geração de energia elétrica.

MATERIAL E MÉTODOS

Esse trabalho está sendo realizado na ETE Laboreaux, dimensionada para atendimento de uma população de 123.000 habitantes, a ser atingida em 2029, com uma primeira etapa de implantação dimensionada para a população de 70.000 habitantes. 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), além da unidade de desidratação (filtro-prensa). As Figuras 1 e 2 mostram o layout e uma vista geral das unidades da ETE Laboreaux, respectivamente.

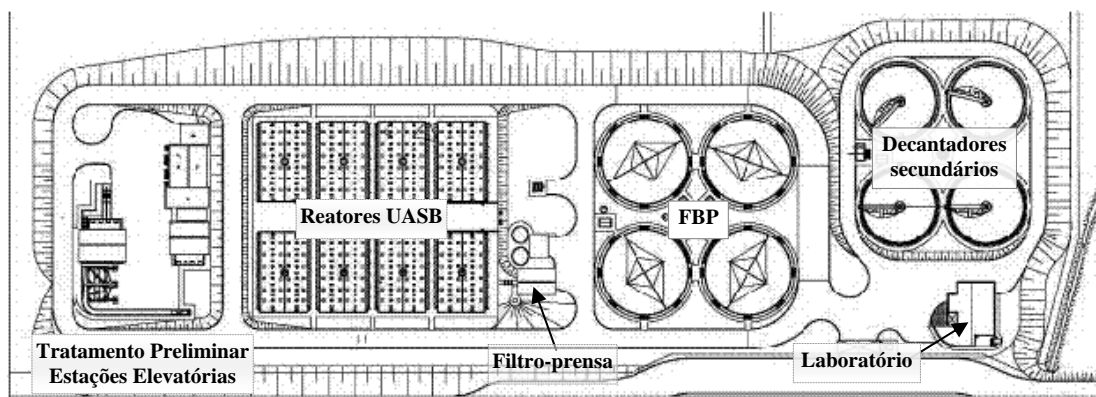


Figura 1: Layout das unidades da ETE Laboreaux



Figura 2: Vista geral das unidades da ETE Laboreaux

A etapa de tratamento preliminar conta com uma estação elevatória de esgotos (EE01) entre a unidade de gradeamento e de desarenação. Após passarem pela unidade de desarenação, os esgotos são novamente bombeados, através da EE02, para a caixa divisora de vazões (CDV1), que alimenta os reatores UASB. O lodo produzido nos filtros biológicos percoladores e recolhido nos decantadores secundários é retornado para os reatores UASB, objetivando o adensamento e a estabilização. Dessa forma, todo o lodo produzido na ETE



é descartado a partir dos reatores UASB, indo diretamente para a unidade de desidratação (filtro-prensa), para posterior disposição final. A Tabela 2 apresenta as principais características da ETE Laboreaux.

Tabela 2: Principais características da ETE Laboreaux

Características	Unidades	
	UASB	FBP
População (hab.)	70.000 (123.000)	
Vazão média* (L/s)	170 (313)	
Nº de unidades	8 (16)	2 (4)
Tipo	Retangular	Circular
• Dimensões (m)	21,70×6,20	D=22,50
• Profundidade útil (m)	4,50	2,50
Produção de lodo (kgSST/d)	1.409 (2.758)	
Produção de lodo** (m³/d)	34,5 (67,69)	

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

* Vazão atual de esgoto afluyente a ETE Laboreaux: 70 L/s

** Considerando a concentração do lodo igual a 4 %

O presente trabalho está sendo desenvolvido com base em dois grandes tópicos: i) aproveitamento energético do biogás para a geração de energia elétrica; ii) aproveitamento energético do biogás para a secagem térmica do lodo, conforme ilustrado no diagrama da Figura 3.

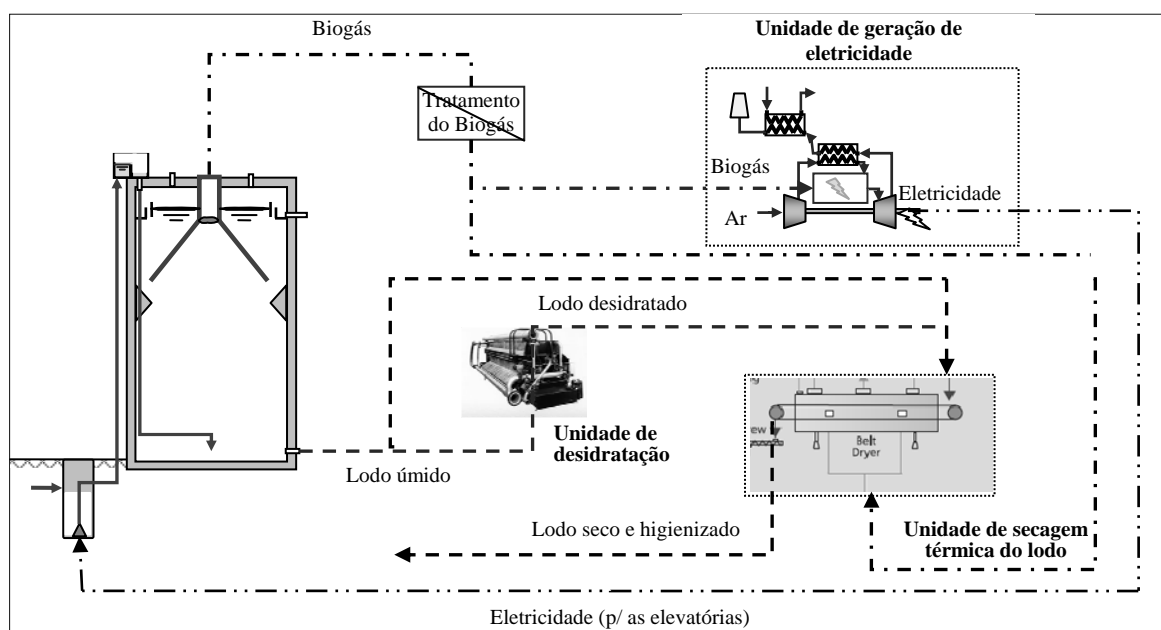


Figura 3: Fluxograma de aproveitamento energético proposto para a ETE Laboreaux

Desenvolvimento de modelo para estimativa do balanço de metano

A fim de se verificar a quantidade de metano efetivamente disponível para geração de energia, desenvolveu-se um modelo para estimativa do balanço de emissões de metano em reatores UASB, considerando a parcela contida na fase gasosa (biogás e gás residual) e dissolvida na fase líquida (perda com o efluente).

O balanço de DQO e de energia em reatores UASB tratando esgotos domésticos foi feito a partir de um modelo matemático, desenvolvido especialmente para essa finalidade. Buscou-se estruturar o modelo de forma bem simples, de forma a se ter um reduzido número de dados de entrada e 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 mostrados na Figura 4.

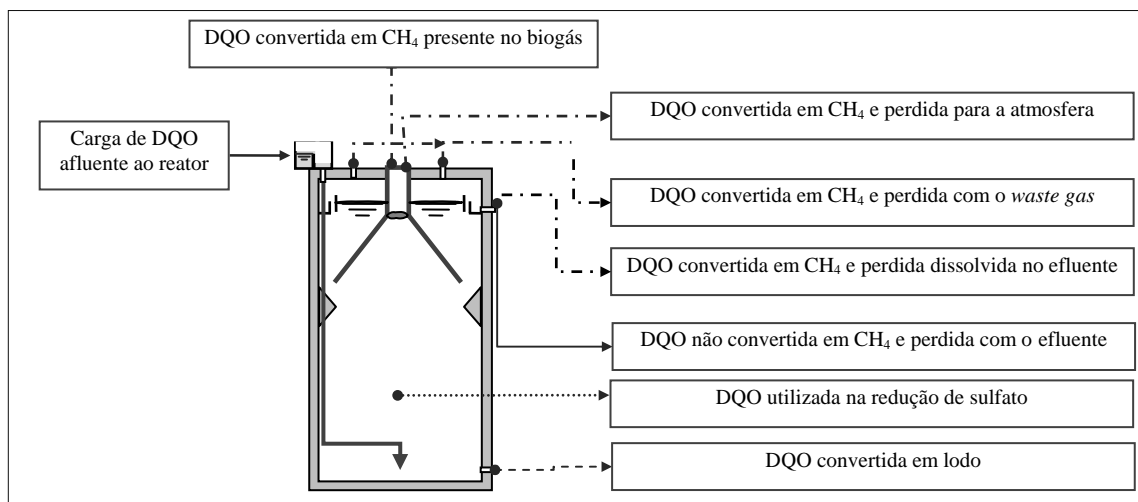


Figura 4: Rotas de conversão de DQO e fluxos de metano em reatores UASB

Caracterização do biogás e do lodo gerado na estação

A caracterização do biogás com vistas à verificação do seu potencial energético teórico e real está sendo realizada por meio de análises cromatográficas, com determinação da composição em porcentagens de CH_4 , CO_2 , N_2 e H_2S .

A caracterização do lodo (análises de ST e STV) está sendo realizada com o intuito de se determinar as taxas de produção bem como as suas características de interesse, sobretudo aquelas relativas à desidratação, e com isso verificar qual a energia necessária para evaporar a água contida no lodo, isto é, para a sua secagem térmica.

A partir da caracterização do biogás e do lodo é possível determinar a disponibilidade energética do primeiro e do requisito energético, para a secagem térmica, do segundo.

Principais alternativas para co-geração de eletricidade e calor

As principais alternativas para geração de energia elétrica estão sendo consolidadas a partir de uma ampla revisão da literatura, envolvendo os seguintes itens principais: descrição da alternativa; princípio de funcionamento; ilustrações; confiabilidade; requisitos de purificação para diferentes usos; comparativo de vantagens e desvantagens; eficiência; custos e grau de aplicabilidade para o caso de reatores UASB tratando esgotos domésticos (diluídos).

Principais alternativas para secagem térmica de lodo

De maneira análoga ao item anterior, também as principais alternativas para secagem térmica de lodo estão sendo consolidadas a partir de uma ampla revisão da literatura.

Desenvolvimento e avaliação de desempenho e das condições operacionais do protótipo para secagem térmica de lodo

A partir do modelo para estimativa do balanço de metano e do estudo das principais alternativas para recuperação de energia a partir do biogás gerado em processos anaeróbios, foi concebido um protótipo capaz de realizar a secagem térmica do lodo a partir do aproveitamento energético do biogás gerado em reatores UASB. Ressalta-se que tal protótipo será instalado na própria área da ETE Laboreaux.



Após a implantação e a realização dos pré-testes e ajustes que se fizerem necessários, o protótipo será testado em diferentes condições operacionais, a fim de se escolher a mais adequada.

O protótipo será avaliado para lodos com diferentes concentrações. Em um primeiro momento serão avaliados os seguintes tipos: i) lodo oriundo dos reatores UASB com concentração de 3 a 5% de sólidos e ii) lodo oriundo de centrifuga ou filtro-prensa com concentração de 20 a 30% de sólidos.

Serão monitorados parâmetros biológicos (ovos de helmintos e *Escherichia coli*) a fim de se verificar a higienização do lodo pelo processo de secagem térmica.

RESULTADOS

Simulações efetuadas utilizando o modelo para estimativa do balanço de metano

Na Figura 5 são apresentados os resultados de simulações efetuadas para se estimar as faixas esperadas de vazões de biogás, coletadas e disponíveis para utilização, nos reatores UASB da ETE Laboreaux. Para efeito dessas simulações, foram consideradas as seguintes variáveis:

- Variação da vazão de esgoto até 313L/s (vazão de esgoto referente ao final de plano - ano 2029)
- Concentração de DQO média afluyente igual a 500 mg/L
- Concentração de SO_4^{2-} afluyente entre 40 e 80 mg/L
- Percentuais de metano no biogás entre 65 e 85%
- Eficiências de remoção de DQO entre 60 e 70%
- Eficiências de redução de sulfato entre 70 e 80%
- Perdas de metano dissolvido no efluente entre 10 e 25 mg/L

Uma vez estimadas as vazões de biogás e de metano disponível para utilização, foram determinadas as faixas esperadas de potencial de geração de energia, conforme apresentado na Figura 5.

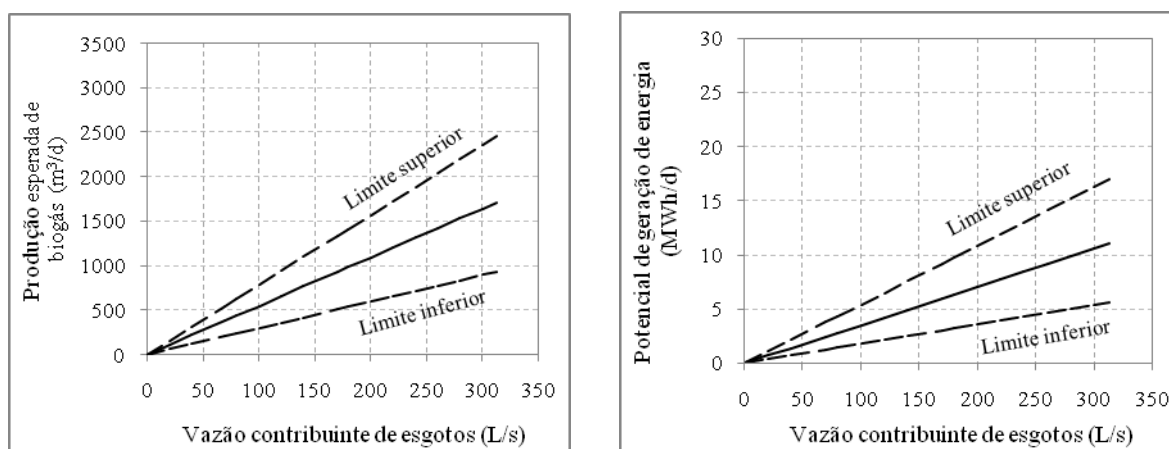


Figura 5: Faixas esperadas de produção de biogás e potencial de geração de energia a partir do biogás coletado nos reatores UASB da ETE Laboreaux - Vazão entre 0 e 350 L/s

Pela Figura 5, é possível observar que podem ser obtidos valores bastante dissonantes de produção de biogás e de potencial de geração de energia, a depender das variáveis de entrada. Para uma dada concentração de DQO afluyente e eficiência de remoção no reator, passam a ser fatores extremamente importantes no balanço energético do sistema as perdas de metano dissolvido no efluente e as concentrações de sulfato no afluyente.

Para os índices simulados de perda de metano dissolvido com o efluente (variando entre 10 e 25 mg/L), foram obtidos percentuais de perda variando entre 12 a 33% da carga de DQO removida no sistema. Em relação às simulações de concentrações de sulfato no afluyente (variando entre 40 e 80 mg/L), foram obtidos percentuais de utilização de DQO para redução de sulfato variando entre 5 e 14% da carga de DQO removida no sistema. Apreende-se, portanto, que, em condições mais desfavoráveis (de elevadas perdas de metano dissolvido e de elevadas concentrações de sulfato no afluyente), esses dois fatores, isoladamente, podem representar um percentual de perda de metano e de energia superior a 50%.

Tais perdas podem ser visualizadas nos gráficos mostrados na Figura 6, que incorporam, ainda, as parcelas de DQO convertidas em biomassa e as perdas de metano na fase gasosa. De maneira geral, os percentuais de conversão de DQO em metano efetivamente disponível para aproveitamento energético variaram de valores próximos a 27% (Figura 6a), para a situação mais desfavorável, até valores em torno de 59% (Figura 6b), para a situação mais favorável.

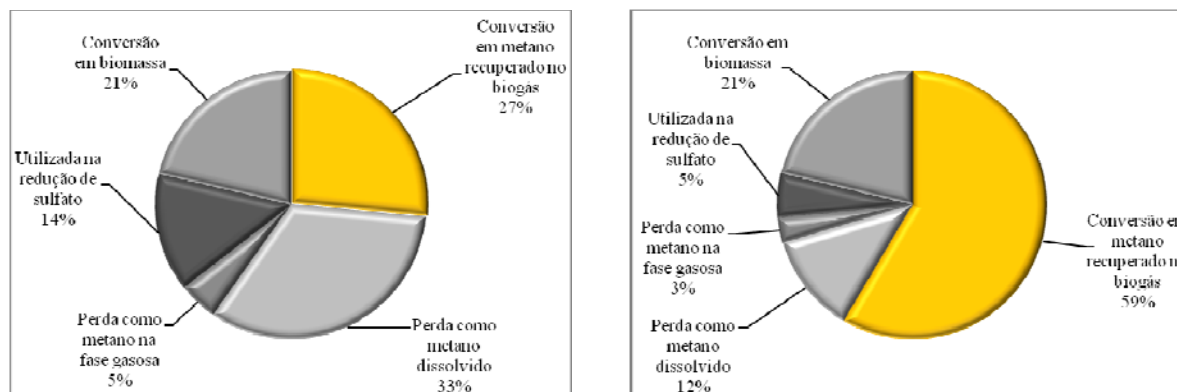


Figura 6: Resultado das simulações de balanço de DQO nos reatores UASB da ETE Laboreaux: (a) pior situação; (b) melhor situação

Com base nas simulações efetuadas, foram obtidas, ainda, as seguintes relações unitárias de produção de metano, de biogás e de energia em reatores UASB, para as vazões: (i) afluyente média a ETE atualmente (70 L/s); (ii) de início de plano (170 L/s) e (iii) final de plano (313 L/s). (Tabela 3)

Tabela 3: Produção de biogás e potencial de geração de energia considerando as simulações efetuadas

Parâmetros	Melhor situação			Valores típicos			Pior situação		
Vazão (L/s)	70	170	313	70	170	313	70	170	313
Percentual de CH ₄ no biogás (%)	75			70			65		
Produção de biogás (m ³ /d)	628	1.526	2.809	458	1.113	2.049	280	679	1.250
Potencial de geração de energia (MWh/d)	4,3	10,6	19,4	3,0	7,2	13,2	1,7	4,1	7,5
m ³ Biogás/kgDQO _{apl}	0,201			0,140			0,076		
m ³ CH ₄ /kgDQO _{apl}	0,151			0,098			0,049		
Relação kWh/kgDQO _{apl}	1,438			0,979			0,554		
Relação kcal/kgDQO _{apl}	1.236			841			477		

As medições de vazão de biogás na ETE Laboreaux indicam o valor médio de 534 m³/d, correspondente a vazão média afluyente de esgotos de 70 L/s. Esse valor encontra-se entre os valores de produção de biogás obtidos para as simulações considerando valores típicos e a melhor situação, 458m³/d e 628 m³/d, respectivamente.

Na Tabela 4 são apresentadas as variáveis de entrada para a realização do balanço de DQO nos reatores UASB da ETE Laboreaux, considerando os dados de monitoramento. Na Figura 7 são apresentados os resultados do balanço de DQO para a condição atual da ETE Laboreaux.



Tabela 4: Variáveis de entrada para o balanço de metano nos reatores UASB da ETE Laboreaux (vazão atual: 70L/s)

Parâmetros	Valores
Vazão afluyente média (L/s)	70
Concentração de DQO (mg/L)	500
Concentração de sulfato no afluyente (m3/d)	35
Eficiência remoção DQO (%)	68
Eficiência de redução de sulfato (%)	80
Perda de metano na fase gasosa com o waste gas (%)	2
Perda de metano na fase líquida (dissolvido no efluente) (mg/L)	20
Outras perdas de metano na fase gasosa (%)	2
Percentual de metano no biogás (%)	70

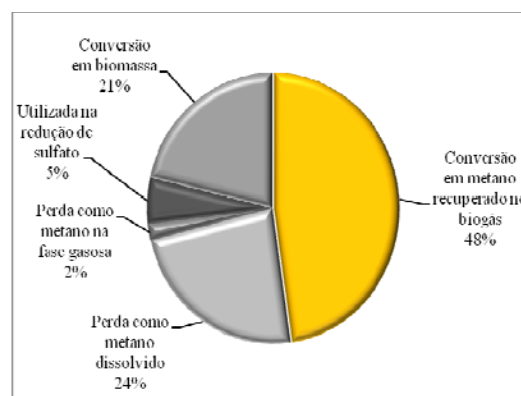


Figura 7: Resultados do balanço de DQO, considerando a situação atual da ETE Laboreaux.

Para a vazão de esgotos afluyente à ETE Laboreaux igual a 70 L/s, foi obtido um percentual de conversão de DQO em metano efetivamente disponível para aproveitamento energético igual a 48%, valor compreendido entre 27% (simulação da pior situação) e 59% (simulação da melhor situação), valores esses apresentados anteriormente na Figura 6. Os percentuais obtidos para perda de metano dissolvido com o efluente (24%) e utilização de DQO para redução de sulfato (5%), também, estão compreendidos na faixa de resultados obtidos nas simulações.

A Tabela 5 apresenta o balanço energético para a ETE Laboreaux, considerando a demanda de energia pelas elevatórias do sistema e o potencial de geração simulado e real.

Tabela 5: Balanço energético para a ETE Laboreaux

Balanço energético	Vazão (l/s)		
	70	170	313
Demanda de energia* (kWh/d)	1000	2.429	4.471
Potencial de geração simulado (kWh/d)	1.677 a 4.348	4.079 a 10.559	7.497 a 19.441
Potencial de geração real (kWh/d)	3.423	-	-

* Valores referentes à demanda energética das elevatórias da ETE Laboreaux.

Conforme se pode apreender a partir dos dados da Tabela 5, o potencial energético do biogás gerado na ETE Laboreaux (3.423 kWh/d) é cerca de três vezes superior à demanda energética das elevatórias. Todavia, a possibilidade de geração de eletricidade, a partir do biogás, para utilização nas elevatórias dependerá principalmente das eficiências, dos custos e dos requisitos de purificação dos equipamentos disponíveis no mercado.

Análise comparativa das principais alternativas para co-geração de eletricidade e calor

Na Tabela 6 é apresentado um resumo comparativo das três principais alternativas de co-geração de eletricidade e calor atualmente disponíveis no mercado: motores de combustão interna, turbinas e micro-turbinas.

**Tabela 6:** Comparação entre as principais alternativas de co-geração de eletricidade e calor

Parâmetro	Principais alternativas		
	Motores de combustão interna	Turbinas	Micro-turbinas
Faixa de potência disponível no mercado (kW)	5 – 5.000	500 – 250.000	30 - 200
Faixa usual de aplicação (kW)	800 - 3000	> 3.000	<1.000
Custo de implantação (US\$/kW)	900 - 1000	1000 - 1800	4000 - 5000
Custos de O&M (excluindo custos de combustível) (US\$/kWh)	0,009 - 0,010	0,006 - 0,010	0,15 - 0,20
Taxa de geração de eletricidade e calor (kWh por kWh)	2,8 - 3,0	3,7 - 4,6	4,1 - 4,7
Eficiência elétrica (%)	33 - 36	22 - 27	22 - 33
Consumo de combustível (kWh/h por kW instalado)	2,8 - 3,0	3,7 - 4,6	3,3 - 7,5
Pressão de alimentação do gás (atm)	< 0,2 - 3,0	6,5 - 11	3,7 - 5,8
Produção de gás de exaustão (kg/h)	6 - 7	15 - 20	23 - 37
Temperatura do gás de exaustão (C)	360 - 470	510	280 - 310
Recuperação total de calor (kWh por kW instalado)	1,10 - 1,28	1,56 - 2,08	3,2 - 3,6
Eficiência total de geração de eletricidade e calor (%)	75 - 76	68 - 69	60 - 73

Fonte: adaptado de (USEPA, 2002; 2003a; b)

Todas as três alternativas apresentam baixas eficiências de geração de eletricidade, notadamente no caso das turbinas e micro-turbinas. As eficiências só atingem níveis mais elevados (da ordem de 65 a 75%) quando o calor liberado pelos motores, turbinas e micro-turbinas é recuperado e utilizado.

As três alternativas de co-geração de eletricidade e calor apresentam faixas usuais de aplicação, em função da potência instalada. As micro-turbinas são usualmente aplicadas para menores faixas de potência (entre 30 e 1.000 kW), os motores de combustão interna para faixas intermediárias de potência (entre 800 e 3.000 kW), e as turbinas para as faixas mais elevadas (acima de 3.000 kW). Todavia, estas faixas são apenas indicativas e se baseiam na experiência atual de utilização do biogás gerado em aterros sanitários.

Para os sistemas de tratamento de médio porte que tratam vazões afluentes médias da ordem de 50 a 500 L/s, como a ETE Laboreaux (vazão de projeto para início de plano igual a 170 L/s e para final de plano igual a 313 L/s), e cujo potencial de produção típica de biogás encontra-se entre 500 e 3.750 m³/d, o potencial energético decorrente dessa produção (valores típicos entre 100 e 1.000 kW) seria indicativo de maior viabilidade para a utilização de micro-turbinas para a co-geração de eletricidade e calor. Todavia, esta tecnologia dificilmente encontraria viabilidade econômica, a não ser em casos muito específicos, notadamente quando o suprimento de eletricidade é não confiável e de preço elevado. Ressalta-se que outros estudos serão realizados com intuito de verificar a viabilidade de se adaptar motores menores para a co-geração de energia a partir do biogás dos reatores UASB da ETE Laboreaux.

Principais alternativas para secagem térmica do lodo

Como condição geral para a secagem térmica, dois processos fundamentais devem ocorrer simultaneamente: (i) transferência de calor para evaporação do líquido e (ii) transferência de massa como líquido ou vapor dentro dos sólidos e como vapor pela superfície. Os equipamentos para secagem térmica são usualmente classificados quanto ao método de transferência de calor para os sólidos úmidos e quanto às características de manuseio e propriedades físicas dos mesmos. Quanto ao processo de transferência de calor, os secadores térmicos podem ser classificados em diretos ou indiretos. Nos secadores diretos, a transferência de calor é realizada por convecção, ou seja, através do contato direto do lodo com o meio de secagem (ar quente, gases de combustão ou vapor aquecido), que serve como fonte de calor para o aquecimento do sólido e, consequentemente, para a remoção de umidade. Devido ao contato direto entre o lodo e o meio de secagem, a taxa de transferência de calor é mais alta. Nos secadores indiretos, a transferência de calor ocorre por condução, ou seja, através de uma parede metálica que separa o lodo do meio de secagem (óleo ou vapor). O fato de não ocorrer o contato direto do meio de secagem e o lodo constitui uma vantagem quanto à geração de gases e odores. A Tabela 7 apresenta as características das principais alternativas para secagem térmica do lodo excedente dos reatores UASB.

**Tabela 7:** Características das principais alternativas para secagem térmica do lodo

Tipos	Características
Secador rotativo	<ul style="list-style-type: none"> • Cilindros rotativos em que o lodo se desloca ao longo da geratriz inferior pela ação de pás direcionadoras. • Transferência de calor por contato direto ou indireto. • Secador rotativo do tipo direto: o lodo entra em contato com uma corrente de ar quente ao longo de seu percurso, o que promove a evaporação da água. • Secador rotativo indireto: possui o cilindro principal, por onde circula o lodo, encamisado por outro cilindro. Entre os dois cilindros, circula o meio de secagem. • Fluxo do meio de secagem pode ser corrente (maior eficiência térmica e menor produção de odores) ou em contracorrente, em relação ao fluxo de lodo.
Secador transportador de esteira	<ul style="list-style-type: none"> • Esteiras transportadoras dentro de uma caixa metálica isolada termicamente. • O lodo úmido é moldado em grânulos por processo de extrusão, antes de ser distribuído sobre a esteira transportadora. • O ar quente atravessa a esteira e a camada de lodo, aquecendo-o e removendo a umidade.
Secador a transporte pneumático ("flash dryer")	<ul style="list-style-type: none"> • Transferência de calor por contato direto. • Longo tubo vertical, no qual circula ar quente em alta velocidade, arrastando os sólidos para cima, enquanto realiza a secagem. • O lodo é triturado e pulverizado na corrente de gás quente, em um desagregador, que evapora, rapidamente, a água das partículas de lodo, enquanto o lodo é arrastado até o ciclone, que separa os sólidos dos gases. • Geração de muitos finos e poeiras, o que aumenta o seu potencial de auto-ignição. • Filtro manga para retirada dos finos antes de serem liberados para a atmosfera. • Recirculação do lodo seco para o início do processo.
Secador de soleiras múltiplas	<ul style="list-style-type: none"> • Transferência de calor por contato indireto. • Meio de secagem: óleo térmico ou vapor em circuito fechado. • Consiste em um tubo cilíndrico vertical hermeticamente fechado, contendo múltiplas soleiras anulares e horizontais montadas umas sobre as outras. O contato do lodo com a soleira provoca seu aquecimento e a evaporação da água.
Secador "spray dryer"	<ul style="list-style-type: none"> • Transferência de calor por contato direto. • Câmara cilíndrica, posicionada na vertical, onde o material, ainda no estado líquido, é alimentado por uma centrifugadora de alta velocidade. • A força centrífuga serve para pulverizar o lodo e aspergi-lo no topo da câmara de secagem, onde ocorre a transferência de umidade para o ar quente, que flui em contracorrente.

CONCLUSÕES

Não obstante à potencialidade de emprego do biogás gerado nos reatores anaeróbios, sua aplicação para a geração de energia é ainda bastante incipiente no Brasil. Ao se buscar, portanto, viabilizar o emprego deste combustível em estações de tratamento de esgotos, tanto para a utilização na secagem térmica e higienização do lodo como para a geração de energia elétrica, poderia estar sendo promovida uma redução nos custos operacionais das mesmas. Além disso, estaria sendo utilizada uma fonte de energia que quase sempre é desperdiçada, seja lançando-a diretamente na atmosfera, seja queimando-a, sem aproveitamento da energia calorífica gerada. O potencial energético do biogás dos reatores UASB da ETE Laboreaux pode ser utilizado tanto na geração de energia elétrica para as elevatórias do sistema, como para a secagem térmica do lodo excedente dos reatores UASB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AWWA/APHA/WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21.ed. Washington, 2005.
2. Andreoli, C.V., von Sperling, M., Fernandes, F. 'Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.' 1.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 484p. (Princípio do tratamento biológico de águas residuárias, 6). 2001.



3. Barbosa, V.L., Stuetz, R.M. 'Treatment of hydrogen sulfide in biofuels'. In: Lens, P., Westermann, P., Haberbauer, M. and Moreno, A. (eds). *Biofuels for fuel cells: renewable energy from biomass fermentation*. London: IWA Publishing, 524 p. 2005.
4. Foresti, E. Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. *Water Science & Technology*, 45, 10, p. 181-186. 2002.
5. Lettinga, G., Man, A., Last, A., Wiegant, W., Knippenberg, K., Frijns, J. & Buren, J. 'Anaerobic treatment of domestic sewage and wastewater'. *Water Science & Technology*, 27, 9, p. 67-73. 1993.
6. Meulepas, R.J.W., Nordberg, A., Mata-Alvarez, J., Lens, P.N.L. 'Methane production from wastewater, solid waste and biomass'. In: Lens P, W.P., Haberbauer M, Moreno A (ed). *Biofuels for fuel cells: renewable energy from biomass fermentation*. London: IWA Publishing, 524 p. 2005.
7. Mulder, A. 'Optimisation of the methane recovery from anaerobic treatment sewage'. In: World Congress Anaerobic Digestion, 9. Antwerpen. Anaerobic Conversion for Sustainability. Proceedings - Part 2, Antwerpen, p.617-619. 2001.
8. 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*, 5, p. 93-114. 2006.
9. USEPA. 'Powering microturbines with landfill gas - EPA430-F-02-012'. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/lmop/res/index.htm#2> (access in 20/05/2008). 2002.
10. USEPA. 'A brief characterization of gas turbines in combined heat and power applications'. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, http://www.epa.gov/chp/chp_support_tools.htm (access in 20/05/2008). 2003a
11. USEPA. 'A brief characterization of reciprocating engines in combined heat and power applications'. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, http://www.epa.gov/chp/chp_support_tools.htm (access in 20/05/2008). 2003b
12. von Sperling, M., Chernicharo, C.A.L. 'Biological wastewater treatment in warm climate regions'. IWA Publishing, London, 1452 p. 2005.