

II-439 – INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA PILOTO DE SECAGEM TÉRMICA DE LODO MOVIDO A BIOGÁS

Gustavo Rafael Collere Possetti⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Engenheiro Eletricista pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre em Ciências e Doutor em Ciências pela UTFPR. Engenheiro da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE-FGV).

Julio Cezar Rietow

Engenheiro Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Ex-estagiário da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

Ronald Gervasoni

Engenheiro Ambiental pela Universidade Tuiuti do Paraná. Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), em parceria com a Universidade de Stuttgart e o Senai. Engenheiro da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

Christine Albrecht Althoff

Engenheira Química pela Universidade Regional de Blumenau (FURB). Coordenadora de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Albrecht Equipamentos Industriais Ltda.

Charles Carneiro

Engenheiro Agrônomo, Mestre em Ciências do Solo e Doutor em Geologia Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Pós-doutor em Engenharia e Ciência da Água pela UNESCO-IHE, Holanda. Gerente da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE-FGV) e do Curso de Pós-Graduação em Economia e Meio Ambiente da UFPR.

Endereço⁽¹⁾: Rua Engenheiro Antônio Batista Ribas 151 - Tarumã - Curitiba - PR - CEP: 82.800-130 - Brasil - Tel: +55 (41) 3330-7259 - e-mail: gustavorcp@sanepar.com.br; grcpossetti@gmail.com

RESUMO

Os sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto doméstico estão sendo muito utilizados no Brasil. Esses sistemas possibilitam a produção do biogás, um subproduto dotado de grande potencial energético por conter metano em sua composição. Esses sistemas também produzem lodo, um subproduto que tipicamente possui elevado teor de umidade e que contém micro-organismos patogênicos, sendo então seu desaguamento e higienização necessários para sua correta destinação. Entretanto, os custos inerentes a esses processos limitam o gerenciamento do lodo dentro de uma estação de tratamento de esgoto (ETE), demandando soluções tecnológicas para tal. Nesse contexto, o presente trabalho vem relatar um estudo sobre a secagem térmica do lodo em um sistema piloto envolvendo o aproveitamento energético do biogás produzido por reatores anaeróbios de uma ETE de médio porte. De modo geral, o sistema piloto de secagem térmica reduziu em aproximadamente 79% a massa de lodo submetida a esse processo, aumentando a concentração de sólidos totais presentes no material de $(23,49 \pm 1,41) \%$ para $(83,96 \pm 1,33) \%$. Com um teor médio de metano de aproximadamente 78%, a vazão de biogás utilizada nesse sistema foi, em média, $(15,07 \pm 7,51) \text{ Nm}^3/\text{h}$, sendo necessários $(1.323,91 \pm 285,11) \text{ kcal}$ para remover 1 kg de água presente no lodo. Adicionalmente, as características físico-químicas, sanitárias e calorimétricas do lodo seco evidenciaram a possibilidade de seu uso como adubo na agricultura, bem como no aproveitamento energético devido ao aumento de seu poder calorífico. Esses resultados apontam a secagem térmica do lodo, utilizando o biogás produzido em sistemas anaeróbios de tratamento, como uma ferramenta promissora para o setor de esgotamento sanitário no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Secagem Térmica, Lodo, Biogás, Sistemas Anaeróbios, Esgoto.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, disseminou-se no Brasil o tratamento anaeróbio de esgotos domésticos. Para tanto, muitas companhias de saneamento adotaram a tecnologia dos reatores de fluxo ascendente e manto de lodo (UASB, *upflow anaerobic sludge blanket*). Nesses reatores o esgoto é degradado biologicamente, gerando subprodutos como o lodo e o biogás, os quais precisam ser gerenciados de forma ambientalmente correta, sanitariamente segura e economicamente viável.

O biogás proveniente dos reatores UASB é majoritariamente composto por metano, nitrogênio e dióxido de carbono. Em menores proporções ainda podem ser encontrados sulfeto de hidrogênio, oxigênio, hidrogênio, monóxido de carbono, amônia, siloxanos, água e material particulado [1]. O metano define a quantidade de energia que pode ser extraída do biogás. Ele é um composto inflamável, inodoro, incolor, com alto poder calorífico inferior (~50 MJ/kg), bem como é o principal constituinte do biogás [2]. Adicionalmente, o metano é um gás indutor do efeito estufa, com potencial de aquecimento global 25 vezes superior àquele do dióxido de carbono [3].

No Brasil, o biogás produzido em estações de tratamento de esgoto (ETE) é tipicamente captado e conduzido até queimadores abertos, onde é termicamente destruído com baixa eficiência. Isso faz com que a energia química presente em sua composição seja desperdiçada e que as taxas de emissão de gases de efeito estufa inerentes ao material sejam pouco reduzidas. Por isso, com o intuito de minimizar impactos ambientais e de conceber soluções energéticas renováveis, tem-se incentivado a recuperação do biogás, sobretudo para a geração de energia elétrica e/ou térmica.

Os lodos descartados dos reatores UASB, por sua vez, são basicamente constituídos por elevados teores de água ($\geq 95\%$ p/p), bem como por matéria orgânica, nutrientes e micro-organismos patogênicos. A presença de matéria orgânica e de nutrientes potencializa o reaproveitamento do lodo, por exemplo, como fertilizante agrícola e/ou como insumo energético [4]. No entanto, a água e os micro-organismos patogênicos limitam tais práticas, exigindo o condicionamento do material antes de sua disposição final. Por isso, o desaguamento e a higienização de lodos são etapas comumente executadas em ETEs. Cabe destacar, no entanto, que o manejo do lodo pode representar até 40% dos custos operacionais de uma ETE [4]. Assim, a adoção de tecnologias que promovam melhorias no processo de gestão de lodos é de grande valia para companhias brasileiras de saneamento.

Dentre essas tecnologias destacam-se os secadores térmicos de lodo. Isso porque tais equipamentos, ao promoverem o aquecimento do lodo em ambiente controlado, permitem sua higienização sem a necessidade de incorporação de produtos químicos [5]. Assim, a secagem térmica é uma alternativa, por exemplo, ao processo de remoção de micro-organismos patogênicos por estabilização alcalina prolongada [4]. Além disso, a secagem térmica viabiliza elevadas taxas de remoção de água, diminuindo o volume de lodo a ser estocado e transportado até seu destino final. Para cumprir esse papel os secadores térmicos demandam energia, a qual pode ser suprida pelo biogás em uma ETE dotada de reatores UASB.

OBJETIVO DO TRABALHO

Avaliar, por meio de investigações experimentais, o desempenho de um sistema piloto de secagem térmica de lodos movido a biogás no que diz respeito ao consumo de energia e à capacidade de remoção de água e de micro-organismos patogênicos presentes no lodo oriundo de reatores UASB alimentados com esgoto doméstico.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um sistema térmico piloto composto por um secador granular rotativo de lodos (Bruthus, Albrecht), apto a processar até 100 kg/h de lodo úmido, foi provisoriamente instalado em uma ETE com capacidade para tratar até 420 L/s de esgoto doméstico, localizada no município de Curitiba – Paraná. Nela o esgoto gerado por mais de 200 mil pessoas é submetido aos processos de tratamento físico, químico e biológico antes de ser lançado no corpo receptor. A ETE é dotada de seis reatores UASB, os quais produzem cerca de 120 Nm³/h de biogás. Esse subproduto foi captado, condicionado e utilizado como fonte de energia térmica para o secador de lodos.

Para tanto, interligaram-se os gasômetros dos reatores UASB com tubos flexíveis de PVC com diâmetros internos de 50 mm. O biogás foi, então, conduzido até uma câmara de combustão acoplada ao secador de lodos. Esse guiamento foi obtido a partir do acionamento de dois compressores radiais, modulados por inversores de frequência e instalados em série com os tubos condutores de biogás. Um reservatório contendo limalha de ferro também foi incorporado ao sistema com o intuito de diminuir os teores de sulfeto de hidrogênio presentes no biogás.

Na câmara de combustão, o calor oriundo da queima do biogás aqueceu o volume de ar contido em seu interior. Assim, o ar quente foi utilizado como meio suporte para a transferência de calor para o lodo úmido. Essa transferência de calor ocorreu ao longo de um tambor com rotação controlável, capaz de remover a água presente no lodo em um ambiente saturado e de transformá-lo em grãos. Um separador multiciclone foi empregado para segregar os compostos sólidos e gasosos disponibilizados na saída do tambor rotativo. Os compostos gasosos foram, então, conduzidos até um lavador de gases alimentado com água. Os compostos sólidos (lodo seco), por sua vez, foram recolhidos em sacos de rafia. A Figura 1 ilustra um diagrama esquemático do sistema térmico piloto avaliado no âmbito deste estudo.

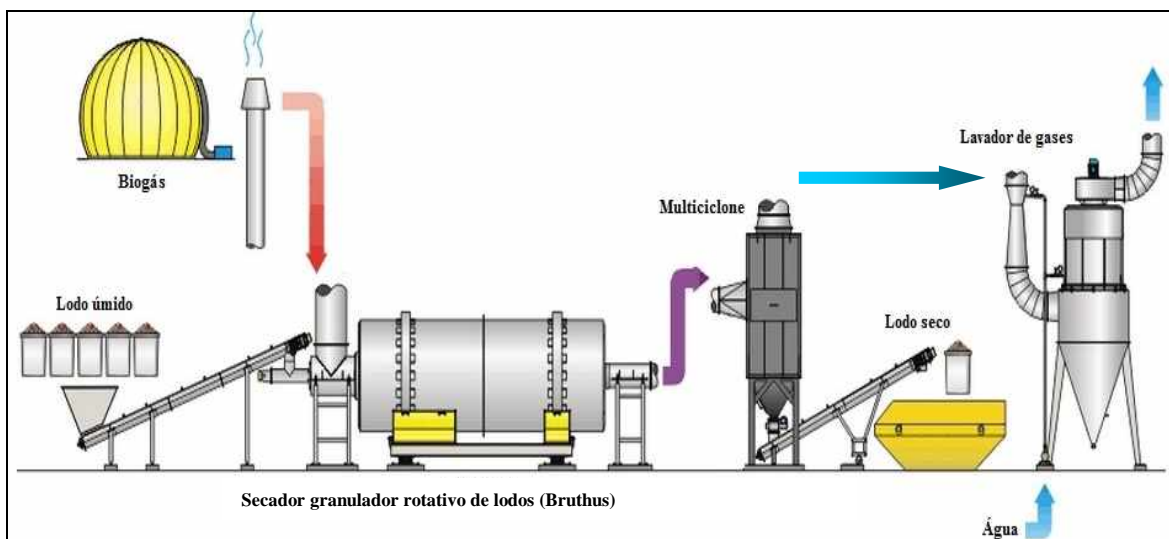


Figura 1: Representação esquemática do sistema térmico piloto de secagem de lodos movido a biogás.

O secador de lodos foi operado ao longo de 62 horas. Nesse sentido, alimentou-se manualmente o equipamento com lodo proveniente de reatores UASB, o qual foi previamente adensado e desaguado com auxílio de uma centrífuga. Os seguintes parâmetros operacionais do sistema foram avaliados sistematicamente: massa de lodo úmido inserido no tambor rotativo, massa de lodo seco na saída do separador multiciclone, temperatura do ar na entrada no tambor rotativo e temperatura do ar na saída do tambor rotativo. As massas de lodo foram quantificadas com o auxílio de uma balança digital com resolução de 1 g. Já as temperaturas do ar foram mensuradas com termopares do tipo K com resolução de 0,1 °C. Os seguintes percentuais das faixas nominais previstas para o acionamento do tambor rotativo, da rosca transportadora de lodo úmido e dos compressores de biogás foram respectivamente adotados: $(41,88 \pm 1,94)\%$, $(11,07 \pm 1,22)\%$ e $(50,77 \pm 8,37)\%$.

A temperatura e a vazão de biogás, durante a operação do secador piloto, foram mensuradas com o auxílio de um transmissor por dispersão térmica Thermochem® (TA2, Magnetrol), com resoluções de 5,6 Nm³/h e 0,1 °C, exatidões de $\pm 1,0$ Nm³/h e $\pm 1,0$ °C e repetibilidades de $\pm 0,5\%$ da leitura. O teor de metano presente no biogás foi determinado com um transmissor óptico seletivo, com resolução de 0,1% v/v, exatidão de $\pm 2,5\%$ v/v e repetibilidade de $\pm 2,0\%$ v/v, operando na faixa do infravermelho (Guardian Plus, Edinburgh Sensors). Ainda verificou-se, por meio do uso de um transmissor de pressão capacitivo (LD301, Smar), com resolução de 0,01 mmca e exatidão de $\pm 0,04$ mmca, a pressão manométrica do biogás. Esses equipamentos foram alimentados eletricamente, sendo conectados a um quadro de comandos dedicado. Eles foram configurados para fornecer sinais analógicos padrão 4-20 mA, os quais foram monitorados em intervalos de 30 segundos e

armazenados em um aquisitor de dados (FieldLogger, Novus). Esses dados foram, posteriormente, transferidos para um computador portátil (Latitude, Dell), sendo sistematizados para quantificar a demanda energia do sistema piloto de secagem térmica.

Durante os experimentos, coletaram-se amostras de lodo antes e depois do processamento no sistema piloto. Os teores de sólidos totais dessas amostras foram quantificados, assim como foram realizadas análises microbiológicas preconizadas na Resolução CONAMA 375/2006 [6]. Sendo assim, a contagem de ovos viáveis de helmintos foi determinada via microscopia. A análise de *salmonellas* foi realizada a partir do método SM 9260/D, com incerteza expandida de $\pm 6,8\%$. Para obter a concentração dos coliformes termotolerantes foi empregado o método SM 9225, com incerteza expandida de $\pm 2,0\%$. Por fim, para a análise de vírus entéricos foi utilizado o método de imunocromatografia. Esses ensaios foram realizados com o intuito de verificar a eficiência do sistema piloto quanto à remoção de água e de micro-organismos patogênicos presentes no lodo.

Amostras do lodo seco ainda foram submetidas às análises elementar, imediata e de poder calorífico. Para determinar os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio utilizou-se o analisador elementar CHNS EA1100 e o eletrodo de íon seletivo (Cole-Palmer). Para quantificar os teores de cinza, matéria volátil, carbono fixo e umidade empregou-se um forno mufla (QUIMIS). Já os poderes caloríficos inferior e superior foram determinados com um analisador térmico DTG-60 (SHIMADZU). Essas análises foram realizadas para verificar o potencial de aproveitamento energético do lodo seco.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o período de investigação foram processados $(4.582,01 \pm 0,05)$ kg de lodo anaeróbio úmido contendo, em média, $(23,49 \pm 1,41)\%$ de sólidos totais. A vazão operacional de alimentação do sistema foi de aproximadamente $(94,83 \pm 33,75)$ kg/h de lodo úmido, sendo essa bem próxima de sua vazão nominal. Na saída do sistema piloto foram obtidos cerca de $(966,20 \pm 0,05)$ kg de lodo seco com teores médios de $(83,96 \pm 1,33)\%$ de sólidos totais. Logo, o sistema piloto removeu $(3.615,81 \pm 0,05)$ kg de água do lodo processado, reduzindo sua massa em aproximadamente 78,91%. As Figuras 2(a) e 2(b) resumem o desempenho do sistema piloto quanto à remoção de água.

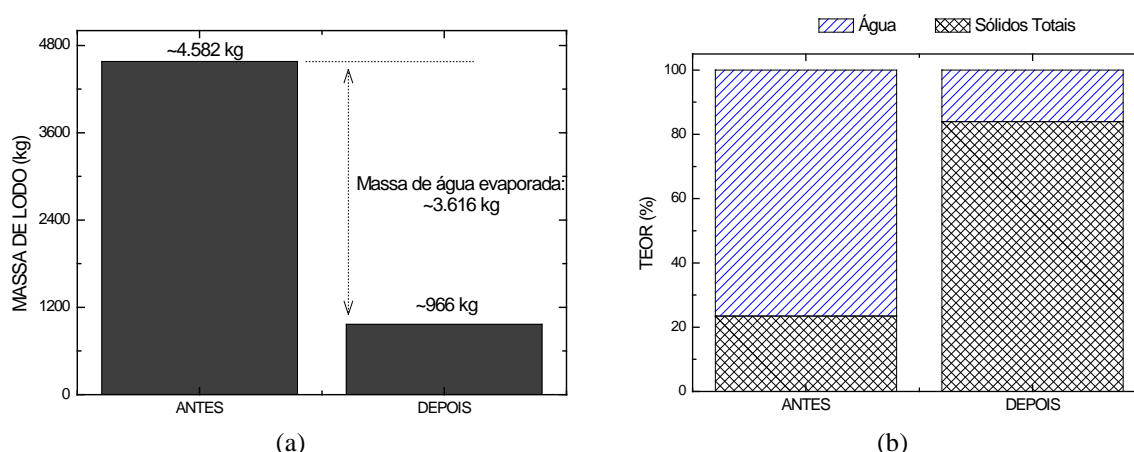


Figura 2: (a) Massas de lodo e (b) teores médios de sólidos totais e de água antes e depois do processamento do lodo no sistema térmico piloto.

Esse desempenho foi obtido com temperaturas do ar de $(205,39 \pm 17,08)$ °C, na entrada do tambor rotativo, e de $(96,17 \pm 9,84)$ °C, na saída do tambor rotativo. Dessa forma, assegurou-se que o processo de secagem do lodo ocorresse em um ambiente saturado e sem que o lodo atingisse temperaturas superiores àquelas inerentes ao seu ponto de ignição.

A vazão média de biogás demandada durante a operação do sistema piloto foi de $(15,07 \pm 7,51)$ Nm³/h, sendo que o teor médio de metano presente em sua composição foi de $(77,68 \pm 5,63)$ % v/v. Esse biogás entrou na câmara de combustão com uma temperatura média de $(24,91 \pm 6,71)$ °C e com uma pressão manométrica de $(776,42 \pm 236,98)$ mmca, evitando que cerca de $(0,22 \pm 0,10)$ tonCO₂eq/h fossem emitidos para a atmosfera. Dessa maneira, verificou-se que a energia necessária para remover 1 kg de água presente no lodo foi, em média, de $(1.323,91 \pm 285,11)$ kcal. Adicionalmente, constatou-se que foram necessários, em média, $(0,24 \pm 0,15)$ Nm³ de biogás para cada 1 kg de lodo úmido processado.

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises microbiológicas do lodo antes e depois do processamento do lodo no sistema térmico piloto. De modo geral, constatou-se que a secagem térmica do lodo reduziu significativamente os teores de ovos viáveis de helmintos e de coliformes termotolerantes. Além disso, o tratamento térmico do lodo promoveu a remoção de *salmonellas* e de vírus entéricos, fazendo com que todos os valores máximos permitidos (VMP) preconizados na Resolução CONAMA 375/2006 para o lodo classe A fossem atendidos [6].

Tabela 1: Indicadores de contaminação biológica do lodo antes e depois de seu processamento no sistema térmico piloto.

Indicador biológico	Unidade	Lodo Anaeróbio		CONAMA 375/2006 (VMP) [6]
		Antes	Depois	
Ovos viáveis de helmintos	Ovo/g de ST	5	0,1	< 0,25
<i>Salmonellas</i>	UFC ⁽¹⁾ /g de ST	9,9x10 ³	Ausente	Ausente
Vírus Entéricos	UFF ⁽²⁾ /g de ST	> 10	Ausente	< 0,25
Coliformes Termotolerantes	UFC/g de ST	2,3x10 ⁴	70	< 10 ³
Observações:				
⁽¹⁾ Unidade Formadora de Colônia				
⁽²⁾ Unidade Formadora de Foco				

A Tabela 2, por sua vez, sumariza os resultados obtidos nas análises elementar, imediata e de poder calorífico do lodo seco. As concentrações de carbono elementar (23,66%, b.s.), matéria volátil (50,27%, b.s.) e carbono fixo (4,08%, b.s.), bem como o poder calorífico inferior (2.497,84 kcal/kg, b.s.), indicam que o lodo seco possui um bom potencial para ser utilizado para fins energéticos, inclusive como fonte de energia para o próprio sistema térmico piloto que o gerou. Desse modo, a utilização do lodo seco, assim como do biogás, pode ser considerada como uma alternativa para redução dos custos operacionais intrínsecos à secagem térmica do material.

Além disso, a elevada concentração de cinzas (45,55%, b.s.) encontrada no lodo seco realça o processo de estabilização do lodo no interior dos reatores UASB, indicando que teores consideráveis de minerais estão presentes em sua composição. As concentrações de nitrogênio (3,15%, b.s.) e de enxofre (3,44%, b.s.) sugerem a importância do monitoramento de efluentes gasosos, caso o lodo seco seja transformado termicamente em combustores, visto que esses compostos podem originar óxidos de nitrogênio e de enxofre.

Tabela 2: Propriedades físicas, químicas e calorimétricas do lodo seco.

Análises	Parâmetros	Lodo Seco
Elementar	Carbono (C - %, b.s. ⁽¹⁾)	23,66
	Hidrogênio (H - %, b.s.)	4,95
	Nitrogênio (N - %, b.s.)	3,15
	Enxofre (S - %, b.s.)	3,44
	Oxigênio (O - %, b.s.)	19,25
Imediata	Cinzas (% b.s.)	45,55
	Matéria Volátil (% b.s.)	50,37
	Carbono fixo (% b.s.)	4,08
	Umidade (% bruta)	20,04
Poder Calorífico	PCS (% kcal/kg b.s.)	2.877,56
	PCI (% kcal/kg b.s.)	2.497,84
Observações:		
⁽¹⁾ Base Seca		

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho permitem afirmar que os secadores térmicos de lodos movidos a biogás são uma promissora tecnologia para o gerenciamento de lodos em ETEs, uma vez que permitem diminuir significativamente o volume do material que precisa ser estocado e transportado até seu destino final. De modo geral, o sistema piloto de secagem térmica foi responsável por reduzir em aproximadamente 79% a massa de lodo úmida, levando o material a um teor médio de sólidos totais da ordem de 84%.

Além disso, constatou-se que o biogás produzido por reatores UASB pode ser utilizado como fonte de energia para o processo de secagem do lodo. Nesse sentido, verificou-se que, em média, foram necessários $(0,24 \pm 0,15)$ Nm³ de biogás para cada 1 kg de lodo úmido processado, considerando teores médios de cerca de 78% v/v de metano. Assim, determinou-se que para a remover de 1 kg de água presente no lodo foram necessários, em média, $(1.323,91 \pm 285,11)$ kcal.

Comprovou-se ainda que o sistema térmico piloto é capaz de higienizar o lodo de esgoto em níveis que permitem seu enquadramento como classe A, conforme preconizado na legislação brasileira, sem demandar o uso de produtos químicos.

Por fim, verificou-se que o lodo seco pode ainda ser utilizado como combustível, uma vez que possui um poder calorífico inferior de 2.497,84 kcal/kg. Nesse caso, o lodo poderia ser empregado, por exemplo, como fonte complementar de energia para o próprio processo de secagem térmica do material.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio operacional daqueles que se envolveram com o presente estudo, em especial os colaboradores da Sanepar, lotados na Unidade de Serviços de Esgoto da Região Metropolitana de Curitiba (USEG) e que trabalham na ETE Santa Quitéria, bem como os colaboradores da Albrecht Equipamentos Industriais Ltda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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, vol. 5, 2006.
2. CONSTANT, M.; NAVEAU, H.; FERRERO, G. L.; NYNS, E. J. *Biogas end-use in the European community*. Elsevier Science Publisher, England, 1989.
3. IPCC. *Climate Change 2013: The physical science basis: contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
4. ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001.
5. DAVID, A. C. *Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio*. Dissertação (Mestrado em Energia). Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.
6. BRASIL. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.