

XI-040 - INFLUÊNCIA DA ROTA DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS SOBRE A OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DA FASE SÓLIDA DO TRATAMENTO DE ESGOTOS

Patricia Schroeder⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Mestranda em Recursos Hídricos na COPPE/UFRJ.

Isaac Volschan Junior

D.Sc., Professor Adjunto do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica da UFRJ.

Endereço⁽¹⁾: Rua Getúlio Vargas, 130/301 – Centro – Rio Bonito – RJ – CEP: 28800-000 – Brasil – Tel: +55 (21) 2734-1093 – e-mail: schroeder@poli.ufrj.br

RESUMO

Perante o inevitável crescimento da população atendida por sistemas de esgotamento sanitário e do consequente aumento da geração de lodo pelas estações de tratamento de esgotos, o setor de saneamento se encontra diante do desafio de otimizar técnica e economicamente o processamento e a destinação final deste resíduo. Concomitantemente, o setor deve também empreender ações no sentido da eficientização energética de suas operações, e neste sentido, o presente trabalho tem como principal objetivo apresentar um modelo de otimização do aproveitamento do biogás gerado na etapa de digestão anaeróbia do lodo, cuja formulação permite desde seu reaproveitamento na própria ETE até sua utilização para a geração de energia elétrica. O trabalho tem como referência um estudo de caso hipotético para a população de 1.000.000 de habitantes. Observou-se que, para o estudo de caso, é melhor o balanço energético da opção que propõe o integral aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica através de turbinas, utilizando os gases quentes então gerados como fonte de calor para a unidade de secagem térmica, do que aquela que privilegia o seu direto aproveitamento na própria fase sólida do tratamento, como combustível da unidade de secagem térmica, e somente utiliza o seu excedente para a geração de energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Gases quentes, Secagem térmica, Turbina.

INTRODUÇÃO

As tecnologias de geração de biogás são aquelas que têm por objetivo principal maximizar a produção de metano na etapa de estabilização do lodo, independentemente do destino final que se pretende dar a ele. O gás gerado pode ser usado para aproveitamento na própria ETE como fonte combustível nos processos de tratamento, reduzindo a demanda de gás natural, ou para geração de energia elétrica (GWRC, 2008).

Com tal objetivo, utilizam-se os processos de hidrólise térmica ou de destruição celular, em unidades anteriores à digestão anaeróbia. Pode-se empregar, ainda, a digestão anaeróbia termofílica ou a digestão em vários estágios.

A hidrólise térmica e a destruição celular têm como princípio a criação de condições favoráveis para a solubilização dos sólidos presentes no lodo, acelerando a liberação do material orgânico nele contido para degradação anaeróbia e conseqüente geração de biogás.

A digestão termofílica, por sua vez, se caracteriza pela faixa de temperatura entre 50-60°C. Nessa faixa, desenvolvem-se as bactérias termofílicas. Com relação ao processo mesofílico, a digestão termofílica apresenta vantagens, tais como menor tempo de detenção do lodo, maior destruição de patogênicos, melhores características de desidratação, maior redução de sólidos voláteis e, conseqüentemente, maior produção de biogás. Entre as desvantagens, estão maior consumo de energia para aquecimento, maior concentração de amônia, maior produção de odores (GWRC, 2008).

Já na digestão anaeróbia em vários estágios, ocorre primeiramente a digestão termofílica, à temperatura de 65°C. Em seguida, passa-se a um segundo estágio, no qual se dá a digestão mesofílica, a 37°C. O tempo de detenção é da ordem de 2,5 dias para a primeira parte do processo, acrescido de 10 dias no digestor mesofílico. Nesse processo, o lodo é também higienizado, o que é uma vantagem em relação à digestão unicamente mesofílica. O consumo de biogás é da ordem de 0,09 kWh/hab.dia, enquanto a produção de gás é de 0,13 kWh/hab.dia (NEDER, 2005). Na digestão anaeróbia em dois estágios, há significativo aumento da produção de biogás, com o aumento da destruição dos sólidos voláteis (GWRC, 2008).

Alternativas para o aproveitamento do biogás:

- Geração de energia para a mistura e o aquecimento do lodo no biodigestor;
- Geração de energia para o secador térmico;
- Geração de energia elétrica por meio de microturbinas;
 - Utilização da energia elétrica no secador térmico;
 - Utilização da energia elétrica para comercialização no mercado.
- Geração de energia elétrica por meio de motores do Ciclo Otto;
- Uso veicular do biogás;
- Iluminação a biogás;

Neste trabalho são sugeridas duas opções para o aproveitamento do biogás gerado pela digestão anaeróbia do lodo: o cenário que privilegia o aproveitamento direto do biogás na própria fase sólida do tratamento, como combustível da unidade de secagem térmica, e que preconiza a utilização de somente seu excedente para a geração de energia elétrica através de turbinas; e o cenário que preconiza o aproveitamento integral do biogás para a geração de energia elétrica através de turbinas, utilizando os gases quentes então gerados como fonte de calor para a unidade de secagem térmica.

METODOLOGIA

O balanço de energia implícito ao modelo considera que, prioritariamente, o biogás venha ser utilizado para manutenção de condições mesofílicas das próprias unidades de digestão anaeróbia (mistura e aquecimento do lodo), e que a parcela excedente possa ser utilizada de acordo com as seguintes diferentes rotas que empregam a secagem térmica como tecnologia para redução volumétrica do lodo:

- Uso direto e integral do biogás excedente da digestão anaeróbia, como combustível da unidade de secagem térmica; uso da parcela excedente para a geração de energia elétrica por meio de microturbina;
- Uso direto e integral do biogás excedente da digestão anaeróbia para a geração de energia elétrica por meio de microturbina, e aproveitamento dos gases quentes então gerados como fonte de calor para a unidade de secagem térmica.
- A formulação do modelo também incorpora as seguintes premissas:
 - Emprego de equipamento de secagem térmica para o alcance de 90% de teor de sólidos no lodo seco, cuja tecnologia é determinada com base na especificação de módulo com capacidade de 3.000 kgH₂O evaporada/h, para o caso de equipamentos baseados em transferência de calor por contato (massa de lodo em contato com a superfície aquecida do secador), dos tipos disco ou tambor rotativo indireto, para a secagem do lodo segundo valores desde até 40% de TS;

- A demanda de energia elétrica exercida pela secagem térmica é prioritariamente suprida pela energia gerada pelas turbinas, e no caso, somente a energia elétrica gerada em excesso pode ser comercializada, gerando receita.

O modelo encontra-se desenvolvido em planilha eletrônica Excel®, sendo as principais equações utilizadas para sua formulação apresentadas na Tabela 1. O exemplo de aplicação do modelo estabelece como estudo de caso, a geração de 35 tSST/d (massa seca de lodo), equivalente ao lodo desidratado (teor de sólidos de 30%) gerado por uma população de 1.000.000 de habitantes.

Tabela 1: Equações utilizadas no modelo de avaliação econômica.

Parâmetro	Equação	Terminologia
Produção de biogás (Nm³)	$P_{\text{biogás}} = p_{\text{biogás}} \cdot \text{MSV}_{\text{dest}}$	$p_{\text{biogás}}$ é a produção específica de biogás (m³/kgSVd)
		MSV_{dest} é a massa de sólidos voláteis destruída (kgSVd)
Energia (+) por biogás (70% de CH ₄) (MJ)	$E_{\text{biogás}} = \text{PC}_{\text{biogás}} \cdot P_{\text{biogás}}$	$\text{PC}_{\text{biogás}}$ é o poder calorífico do biogás em (MJ/Nm³)
Perda (-) de calor do lodo (MJ)	$C_{\text{lodo}} = \text{MS}_{\text{dig}} \cdot \phi \cdot \Delta T_1$	MS_{dig} é a massa seca afluyente ao digestor (kgSST)
		ϕ é o calor específico da água (MJ/kg.°C)
		ΔT_1 é a diferença entre as temperaturas interna ao digestor e do lodo bruto
Perda (-) de calor paredes do digestor (MJ)	$C_{\text{parede}} = \eta \cdot A \cdot \Delta T_2$	η é o coeficiente de transferência de calor (MJ/s.m².°C)
		A é a área das paredes do digestor (m²)
		ΔT_2 é a diferença entre as temperaturas interna e externa ao digestor (°C).
Energia (-) bombeamento e mistura do lodo (MJ)	$E_{\text{bomb+mist}} = V_{\text{lodo}} \cdot E_{\text{bombeamento}} + V_{\text{digestor}} \cdot E_{\text{mistura}}$	V_{lodo} é o volume de lodo afluyente ao digestor (m³)
		$E_{\text{bombeamento}}$ é a energia específica para bombeamento do lodo (MJ/m³)
		V_{digestor} é o volume do digestor (m³)
		E_{mistura} é a energia específica para mistura do lodo (MJ/m³)
Energia (-) secador térmico (Gcal/d)	$E_{\text{st}} = \text{MS}_{\text{st}} \cdot \beta \cdot \Delta T_3 + M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \lambda$	MS_{st} é a massa seca afluyente ao secador térmico (kgSST)
		β é o calor específico do lodo seco (Mcal/t.°C)
		ΔT_3 é a diferença entre as temperaturas do lodo seco e desidratado (°C)
		$M_{\text{H}_2\text{O}}$ é a massa de água a ser evaporada no secador
Biogás (-) secador térmico (Nm³)	$L_{\text{biogás}} = \frac{E_{\text{st}}}{\text{PC}_{\text{biogás}}}$	λ é o calor latente de evaporação da água
Gás natural (-) secador térmico (Nm³)	$L_{\text{gás nat}} = L_{\text{biogás}} - P_{\text{biogás}}$	Já indicado
Gás quente (+) turbina (t)	$Q_{\text{gás quente}} = \text{GE}_{\text{gás quente}} \cdot P$	$\text{GE}_{\text{gás quente}}$ é a geração específica de gás quente (t/MWh)
		P é a quantidade de energia elétrica gerada pela turbina (MWh)

Tabela 1: Equações utilizadas no modelo de avaliação econômica. (continuação)

Parâmetro	Equação	Terminologia
Calor (+) turbina (Mcal)	$C_{\text{turbina}} = Q_{\text{gás quente}} \cdot \varphi \cdot \Delta T_4$	$Q_{\text{gás quente}}$ corresponde a quantidade de gás quente gerada na turbina (t)
		φ é o coeficiente de geração de calor (Mcal/t.°C)
		ΔT_4 é a diferença de temperatura entre o gás quente e o gás efluente
Geração de energia na turbina (Mcal/d)	$E_{\text{turbina}} = \text{BS} \cdot \eta$	BS é o biogás excedente (diferença entre $P_{\text{biogás}}$ e $L_{\text{biogás}}$) (N/m³d)
		η é o rendimento da turbina a gás (%)

Tabela 2: Parâmetros Operacionais da Unidade de Digestão Anaeróbia

Parâmetro	Valores Usuais ^a	Unidade	Valor Adotado
TS lodo bruto	3,0-5,0 ^b	%	3,0
Massa específica lodo bruto	1.005-1.010 ^b	kg/m³	1.009
Conversão de SV	40-55 ^a	%	50
Produção específica de biogás	0,8-1,1 ^a	m³/kgSV destruídos	1,1
Produção específica de biogás	0,4-0,7	m³/kgSV afluente	-
Produção específica de biogás	0,3-0,4	m³/m³ lodo afluente	-
CH ₄ /biogás ^a	65-70 ^a	%	-
Poder calorífico específico do biogás (70% CH ₄)	22,5-25,0 ^b	MJ/m³ biogás	20,93 ^d
Poder calorífico específico do biogás (70% CH ₄)	5.370-5.970 ^b	kcal/m³ biogás	5.000 ^d
Poder calorífico específico do biogás (70% CH ₄)	6,25-10 ^a	kW/m³ biogás	5,86 ^d
Poder calorífico específico CH ₄	35,8 ^b	MJ/m³ CH ₄	-
Poder calorífico específico do gás natural	37,3	MJ/m³ gás natural	-
Poder calorífico específico do gás natural	10,4	kW/m³ gas natural	-
Produção de gás específica lodo primário	20 ^b	L/hab.d	-
Produção de gás específica lodo misto	30 ^b	L/hab.d	-
Poder calorífico específico do lodo bruto	15-25 ^a	MJ/kgSTbruto	-
Poder calorífico específico do lodo digerido	8,0-15,0 ^a	MJ/kgST lodo digerido	13
Poder calorífico específico do lodo digerido	5500 ^b	kcal/kgSV lodo dig.	5.500
Energia específica bombeamento lodo	-	MJ/m³ lodo	1,8
Energia específica mistura lodo	-	MJ/m³ digestor	0,3
Temperatura lodo bruto	-	°C	25
Temperatura digestor	-	°C	35
Coeficiente transferência de calor	2-5 ^a	J/s.m².°C	3,0
Calor específico da água	4,2 ^a	kJ/kg.°C	4,2
Eficiência da CHP calor&eletricidade: calor	-	%	55
Eficiência da CHP calor&eletricidade: eletricidade	-	%	35

Notas:

- ^a ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 6. Lodo de esgotos. Tratamento e disposição final. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR. 484 p. 2001
- ^b JORDÃO, E. P; PESSÔA, C. A.. Tratamento de esgotos domésticos. Rio de Janeiro, SEGRAC. 4. Ed, 932p. 2005
- ^c METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill Inc., 2003.
- ^d Projeto Tietê/SABESP (ETEP/ESTÁTICA/JNS). Relatório R4 - Gestão dos Lodos, Relatório de Suporte à Decisão - Novas Tecnologias. 2002.

Tabela 3: Parâmetros Operacionais da Unidade de Secagem Térmica

Parâmetro	Valores Usuais ^a	Unidade	Valor Adotado
Teor de sólidos lodo desidratado	25-30	%	30
Calor específico lodo seco	-	Mcal/t.°C	0,40 ^b
Temperatura lodo desidratado	-	°C	20 ^b
Temperatura lodo seco	-	°C	110 ^b
Calor latente evaporação água	-	-	560 ^b
Consumo específico de energia elétrica	-	kWh/t H ₂ O evaporada	65 ^c
Consumo específico de água potável	-	m ³ /t H ₂ O evaporada	0,04 ^c
Eficiência do secador térmico	-	%	65 ^b
Poder calorífico inferior Gás Natural	-	kcal/Nm ³	9.060 ^b
Geração específica de gás quente	-	t/MWh	15 ^b
Coefficiente geração calor	-	Mcal/t.°C	0,24 ^b
Temperatura gás afluente	-	°C	200 ^b
Temperatura gás quente	-	°C	500 ^b

Notas:

- ^a ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 6. Lodo de esgotos. Tratamento e disposição final. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR. 484 p. 2001
- ^b Projeto Tietê/SABESP (ETEP/ESTÁTICA/JNS). Relatório R4 - Gestão dos Lodos, Relatório de Suporte à Decisão - Novas Tecnologias. 2002.
- ^c ANDRITZ. Informação técnica concedida mediante solicitação.

RESULTADOS

Os desenhos esquemáticos das Figuras 1 e 2 representam as possíveis rotas de otimização do aproveitamento do biogás gerado na etapa de digestão anaeróbia do lodo e indicam os respectivos balanços de energia.

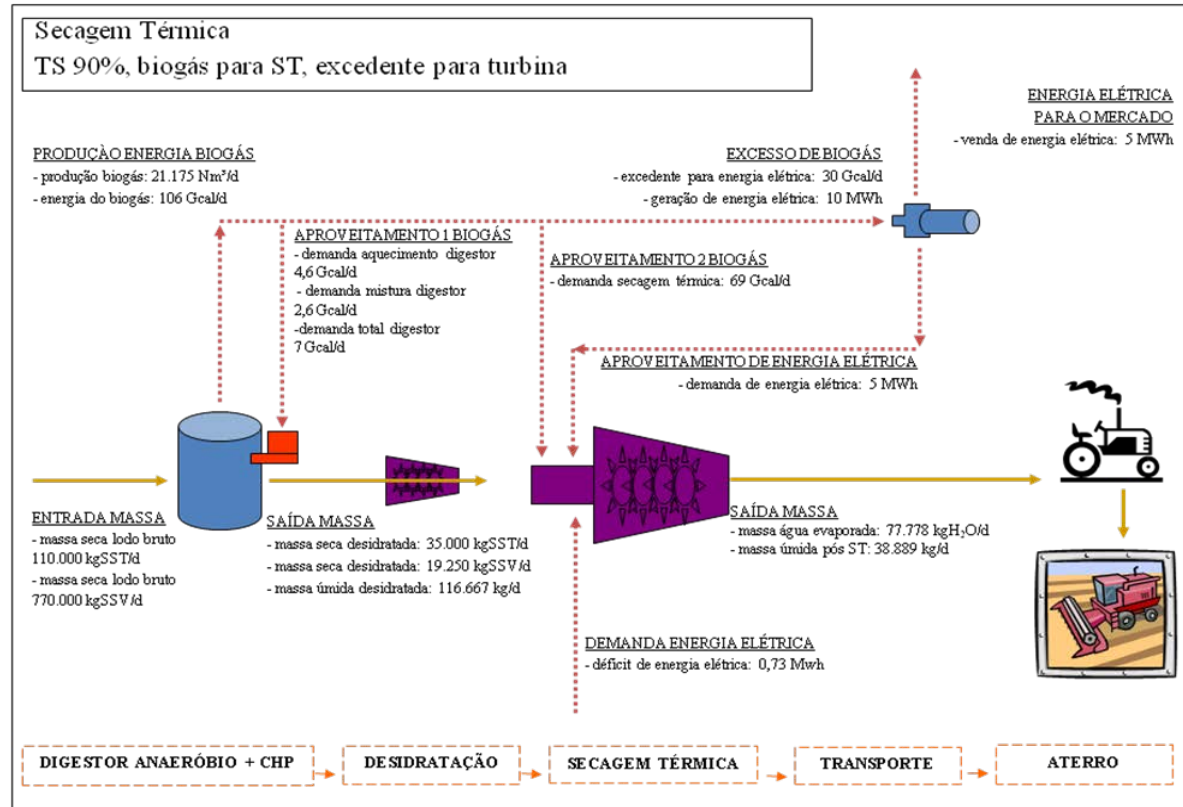


Figura 1: Rotas de otimização do aproveitamento do biogás – uso pelo secador térmico

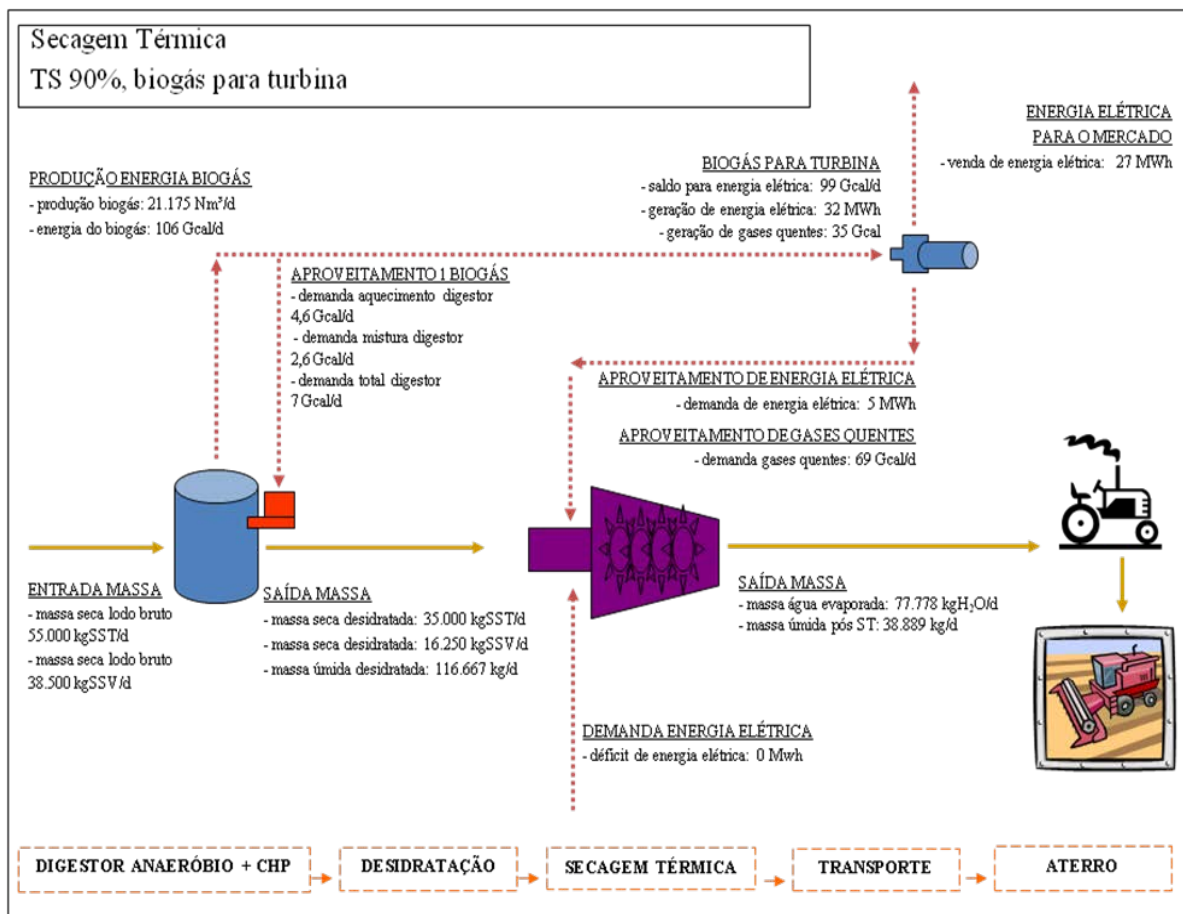


Figura 2: Rotas de otimização do aproveitamento do biogás – uso pela turbina

A avaliação das duas opções para o aproveitamento do biogás gerado pela digestão anaeróbia do lodo mostra que para o estudo de caso, é melhor o balanço energético da opção que propõe o integral aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica através de turbinas, utilizando os gases quentes então gerados como fonte de calor para a unidade de secagem térmica, do que aquela que privilegia o seu direto aproveitamento na própria fase sólida do tratamento, como combustível da unidade de secagem térmica, e somente utiliza o seu excedente para a geração de energia elétrica. A diferença entre os valores obtidos é explicada em função de:

- Quando o biogás é integralmente utilizado para a geração de energia elétrica através de turbinas, há uma maior geração de gases quentes, sendo a demanda de calor requerida para a secagem térmica integralmente suprida pelos gases quentes gerados a partir das turbinas, assim como também é suprida integralmente, a própria demanda de energia elétrica e há uma sobra de energia dos gases quentes e de energia elétrica maior que na opção que prevê o uso do biogás diretamente no secador;
- Além disso, a energia elétrica excedente gerada pelas turbinas pode ser comercializada no mercado, obtendo-se, então, uma possível receita para o processo.

CONCLUSÕES

O modelo de otimização do aproveitamento do biogás gerado pela digestão anaeróbia do lodo serve como importante ferramenta para o planejamento da concepção de ETEs, uma vez que a eficiência da secagem térmica tem influência sobre destinação final do lodo e sobre o balanço energético da própria ETE.

Para o caso em que a fase sólida do tratamento envolve o emprego da secagem térmica, a formulação do modelo contempla todas as opções de aproveitamento do biogás, explicitando que esta não deve ser dissociada de uma rigorosa avaliação quanto ao balanço de energia que estabelece. Para o estudo de caso, objeto de aplicação do modelo, mostrou-se mais eficiente o balanço energético da opção que propõe o aproveitamento integral do biogás para a geração de energia elétrica através de turbinas, utilizando os gases quentes então gerados como fonte de calor para a unidade de secagem térmica.

É mais econômico o aproveitamento integral do biogás da digestão anaeróbia para a geração de energia elétrica através de turbinas, utilizando os gases quentes então gerados como fonte de calor para a unidade de secagem térmica (R\$ 29,00/t úmida e R\$ 118,75/t seca), ao invés de privilegiar o seu aproveitamento direto na própria fase sólida do tratamento, como combustível da unidade de secagem térmica, e somente utilizar o seu excedente para a geração de energia elétrica (R\$ 40,11/t úmida e R\$ 164,24/t seca); o uso direto do biogás na unidade de secagem térmica não é totalmente autossuficiente, havendo unidades que requerem gás natural, em complementação ao biogás (disponibilidade menor que a demanda), além de energia elétrica; quando o biogás é integralmente utilizado para a geração de energia elétrica através de turbinas, o processo torna-se autossuficiente energeticamente, sendo a demanda de calor requerida para a secagem térmica suprida pelos gases quentes gerados a partir das turbinas, assim como também é suprida a própria demanda de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, C.V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 6. Lodo de esgotos. Tratamento e disposição final. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR. 484 p. 2001.
2. JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A.. Tratamento de esgotos domésticos. Rio de Janeiro, SEGRAC. 4. Ed, 932p. 2005.
3. METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: treatment and reuse. New York, McGraw-Hill Inc., 4. Ed, 1815p. 2003.
4. VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte, DESA/UFMG. 484p. 2001.
5. GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte, DESA/UFMG. 484p. 2001.
6. GWRC, Global Water Research Coalition. State of Science Report: Energy and Resource Recovery from Sludge. USA. WERF. 236p. 2008.
7. Projeto Tietê/SABESP (ETEP/ESTÁTICA/JNS). Relatório R4 - Gestão dos Lodos, Relatório de Suporte à Decisão – Novas Tecnologias. 2002.