

XI-077 – ANÁLISE DO FLUXO DE ENERGIA EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO DOMÉSTICO

Jacqueline Shirado⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial (MAUI) pela Universidade Federal do Paraná em parceria com a Universidade de Stuttgart e o Senai. Engenheira da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

Gustavo Rafael Collere Possetti

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).

Karen Juliana do Amaral

Engenheira Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Mestre e Doutora em Engenharia Civil, com ênfase em Recursos Hídricos, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Pesquisadora da Universidade de Stuttgart, Institute for Sanitary Engineering, Water Quality and Solid Waste Management (ISWA), Alemanha. Professora titular do Mestrado Internacional em Meio Ambiente Urbano e Industrial (MAUI).

Endereço⁽¹⁾: Rua Engenheiro Antônio Batista Ribas 151 – Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento, Companhia de Saneamento do Paraná - Tarumã - Curitiba - PR - CEP: 82.800-130 - Brasil - Tel: +55 (41) 3330-7263 - e-mail: jaquelines@sanepar.com.br.

RESUMO

Neste trabalho, aplicou-se a análise de fluxo de energia (AFE) em uma estação de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico (ETE) de médio porte, localizada no município de Curitiba - Paraná, com o intuito de avaliar o desempenho energético de suas operações unitárias, de quantificar potenciais de geração de energia a partir da recuperação de subprodutos e de identificar oportunidades de implementação de ações de eficiência energética. Nesse sentido, determinou-se o consumo de energia elétrica da planta e o potencial de geração de energia a partir da recuperação do biogás, do lodo e da espuma para o ano de 2013. A aplicação da AFE permitiu identificar que a flotação por ar dissolvido, adotada na etapa de pós-tratamento do esgoto, é o processo que mais consome energia na ETE, seguida da elevatória de recalque de esgoto bruto. Verificou-se também que seria possível a geração de mais de 88% da energia elétrica consumida pela ETE em 2013, caso o biogás fosse utilizado para tal fim. O aproveitamento energético do biogás, da espuma e, principalmente, do lodo por meio de sua combustão após prévia secagem demonstrou ser atrativo, em especial se tais subprodutos fossem utilizados como fontes de energia para o processo de secagem térmica dos resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: Análise do fluxo de energia, Estação de tratamento de esgotos, Potencial energético, Biogás, Lodo.

INTRODUÇÃO

De acordo com Deublein e Steinhäuser (2011), no período de 1990 até 2100, a demanda mundial de energia aumentará sete vezes, motivada pelo acelerado crescimento econômico de países emergentes e pelo crescimento populacional no planeta que passará a abrigar mais 10 bilhões de habitantes. Para que tal demanda seja atendida de forma sustentável é imprescindível consolidar uma economia de baixo carbono pautada na conservação e na racionalização de energia, bem como no uso de fontes renováveis de energia, como a biomassa.

Uma estação de tratamento de esgotos (ETE) gera subprodutos, tais como o biogás, o lodo e a espuma, que possuem energia química acumulada em sua composição e que, portanto, podem ser utilizados como fontes para produção de energia limpa e renovável. Embora a recuperação energética desses subprodutos seja bem

consolidada em países como a Alemanha, o Japão e os Estados Unidos, essa prática é incipiente no Brasil, sobretudo em plantas dotadas de reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico.

De acordo com Lima (2005), as prestadoras de serviços de saneamento no Brasil, normalmente, não monitoram a eficiência energética de suas ETEs e raramente estimam a quantidade de energia que elas poderiam gerar. Por outro lado, em países como a Alemanha, essas ações são comuns e padronizadas por normas técnicas, tais como a DWA-A 216, que preconiza a verificação e a análise energética periódica em ETEs.

A análise de fluxo de energia (AFE) é uma ferramenta de suporte à gestão que contabiliza de forma sistemática os fluxos e os estoques de energia em um espaço e tempo definidos (Brunner e Rechberger, 2005). Portanto, a AFE pode auxiliar na identificação de demandas e de potenciais de geração de energia de processos industriais, permitindo a avaliação do desempenho energético global de plantas, bem como de suas operações unitárias.

Tonini *et al.* (2014), por exemplo, identificaram a possibilidade de produzir 6,2 GJ de energia química a partir do uso do biogás proveniente da decomposição de resíduos após empregarem uma AFE em uma refinaria de resíduos municipais. Shirado *et al.* (2014), por sua vez, ao realizar a análise do fluxo de materiais em uma ETE contendo reatores anaeróbios alimentados com esgoto doméstico, diagnosticaram que subprodutos potencialmente poluidores e com energia química acumulada são continuamente gerados e descartados sem recuperação energética. No entanto, os autores não quantificaram em detalhes os potenciais de produção de energia na planta, nem avaliaram o desempenho energético da ETE. Essas informações, no entanto, podem ser obtidas a partir da aplicação de uma AFE, a qual é objeto de investigação deste estudo.

OBJETIVO DO TRABALHO

Realizar a AFE em uma estação de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico de médio porte, localizada no município de Curitiba – Paraná, com o intuito de avaliar o desempenho energético de suas operações unitárias, de quantificar potenciais de geração de energia a partir da recuperação de subprodutos e de identificar oportunidades de implementação de ações de eficiência energética.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo em questão foi realizado em uma ETE dimensionada para tratar até 420 L/s de esgoto doméstico, composta pelas seguintes operações unitárias: estação elevatória de esgoto bruto, gradeamento e desarenador (tratamento preliminar), reatores anaeróbios (tratamento biológico), flotação por ar dissolvido (pós-tratamento) e sistema de desaguentamento e higienização de lodos. A Figura 1 apresenta o diagrama de processo da ETE, contemplando o fluxo do esgoto desde sua chegada até o lançamento no corpo hídrico receptor.

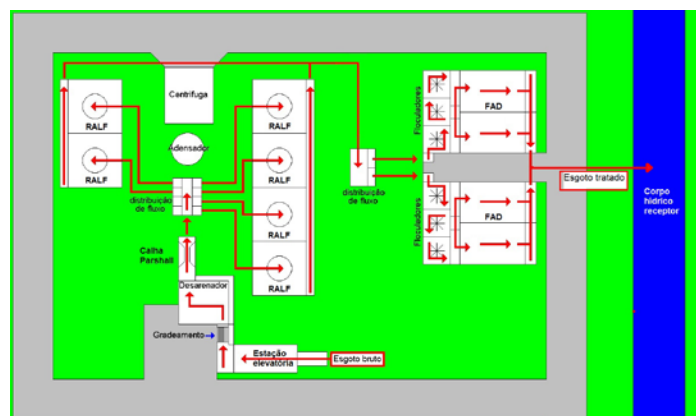


Figura 1: Diagrama de processo da ETE investigada. As setas representam o fluxo de esgoto na ETE (adaptado de Shirado *et al.*, 2014).

O esgoto doméstico que chega até a ETE é acumulado no poço da estação elevatória, que possui 3 bombas centrífugas submersas acionadas por inversores de frequência. Na sequência, resíduos sólidos grosseiros contidos no meio líquido são removidos por uma grade mecanizada com espaçamento entre barras de 20 mm. Após, um desarenador gravitacional quadrado do tipo “Dorr Oliver”, com limpeza de fundo mecanizada, promove a remoção de areias presentes no esgoto. A vazão de esgoto é mensurada com o auxílio de um sensor de nível ultrassônico instalado em uma calha Parshall.

Em seguida, o esgoto é igualmente distribuído para 6 reatores anaeróbios de leito fluidizado (RALFs), os quais foram projetados para tratar individualmente até 70 L/s de esgoto. Nesses reatores ocorre a degradação anaeróbia da matéria orgânica presente no esgoto e, consequentemente, a produção de biogás, de espuma e de lodo. O biogás é captado e encaminhado para queimadores abertos. A espuma retida nas câmaras de gás e de decantação dos reatores é removida bimestralmente por meio de limpezas manuais e destinada para tratamento em outra ETE. O lodo excedente dos reatores é removido rotineiramente, de acordo com a capacidade de processamento disponível na ETE.

Após o tratamento biológico nos RALFs, o esgoto é encaminhado para 2 flotadores por ar dissolvido (FAD), os quais são individualmente precedidos por 3 floculadores. Os FADs são responsáveis pelo polimento físico-químico do esgoto. Utiliza-se o cloreto férrico como substância coagulante. O lodo flotado é retirado a cada 30 minutos dos FADs por meio de raspadores mecanizados. Por sua vez, o lodo de fundo dos FADs é removido pelo menos 1 vez por mês. O efluente líquido dos flotadores é, então, enviado para o corpo hídrico receptor, sendo suas principais características físicas e químicas periodicamente monitoradas, em conformidade com as exigências impostas pela legislação ambiental brasileira.

Os lodos removidos dos RALFs e dos FADs são processados em um sistema de desaguamento, composto por um tanque adensador, por uma centrífuga desaguadora e por um sistema de dosagem de óxido de cálcio (CaO). O óxido de cálcio é incorporado ao lodo desaguado com o intuito de higienizar e de viabilizar a reciclagem agrícola do material.

A AFE foi desenvolvida a partir de dados coletados ao longo do ano de 2013. Dessa forma, inicialmente, obteve-se o histórico do consumo mensal de energia elétrica da ETE, uma vez que essa foi a única modalidade de energia requerida durante o período do estudo. Esses dados foram obtidos junto à concessionária local de distribuição de energia elétrica. Na sequência, foi realizado o levantamento *in loco* dos equipamentos eletromecânicos existentes em cada operação unitária da ETE, conforme sumariza a Tabela 1.

Tabela 1: Equipamentos instalados na ETE investigada por operação unitária.

Operação unitária	Equipamentos	Potência ativa (kW)
Elevatória de recalque de esgoto bruto	Bomba 1	45,00
	Bomba 2	45,00
	Bomba 3	45,00
Gradeamento	Rastelo mecânico com rotação temporizada	0,75
	Esteira transportadora	0,75
Desarenação	Raspador de fundo	0,15
	Braço mecanizado	0,75
Elevatória de recalque dos flotadores	Bomba 1	38,00
	Bomba 2	38,00
	Bomba de recalque de lodo para o adensador	22,80
Sistema de desaguamento de lodo	Raspador de fundo	
	Bomba de recalque de lodo para a centrífuga	
	Centrífuga desaguadora	
	Bomba dosadora de polímero	
	Agitador do tanque de preparo de polímero	
	Misturador lodo e cal	
	Rosca transportadora	

Continua

Operação unitária	Equipamentos	Potência ativa (kW)
Sistema de higienização de lodo	Rosca dosadora de cal	0,75
	Transportadora de cal	3,00
	Desagregador do silo de cal	0,37
FAD 1	Agitador 1	0,38
	Agitador 2	0,38
	Bomba de recirculação	60,00
	Secador	0,17
	Bomba dosadora	0,42
	Raspador 1	0,75
	Raspador 2	0,75
FAD 2	Agitador 1	0,38
	Agitador 2	0,38
	Bomba de recirculação	60,00
	Secador	0,17
	Bomba dosadora	0,42
	Raspador 1	0,75
	Raspador 2	0,75
Compressores	Compressor 1	3,00
	Compressor 2	3,00
Elevatória de lodo flotado	Bomba 1	3,10
	Bomba 2	3,10

O consumo de energia elétrica de cada operação unitária da ETE foi estimado, uma vez que a planta possui apenas um medidor em sua entrada de serviço, o qual integraliza seu consumo total. Para tanto, considerou-se a potência elétrica ativa dos equipamentos (P), dada em kW_e, bem como o tempo (t) de operação de cada equipamento por dia (em horas). Um fator de carga (F_c) foi aplicado àqueles equipamentos que operaram com inversor de frequência e/ou foram parados para manutenção no período avaliado. Assim, o consumo de energia elétrica de cada operação unitária ($E_{elétrica}$), dado em kWh_e/ano, foi calculado da seguinte maneira:

$$E_{elétrica} = P \cdot t \cdot F_c \cdot 365 \quad (1).$$

Adicionalmente, determinaram-se os potenciais de geração de energia elétrica a partir dos subprodutos gerados pela ETE. Para tanto, inicialmente, quantificaram-se as taxas de produção volumétricas de biogás, de lodo e de espuma (Shirado *et al.*, 2014). O modelo proposto por Lobato *et al.* (2012) foi utilizado para estimar o volume de biogás produzido pelos reatores anaeróbios da ETE. O volume de lodo, por sua vez, foi calculado com base na produção da centrífuga desaguadora. Já o volume de espuma foi obtido a partir da multiplicação entre o número de caminhões de sucção necessários para sua remoção dos reatores anaeróbios e a capacidade volumétrica de armazenamento de cada caminhão.

Para estimar o potencial energético inerente ao biogás, assumiu-se que um teor de 75% v/v de metano estava presente em sua composição. Dessa forma, multiplicando-se a taxa de produção volumétricas de biogás pelo teor de metano, calculou-se a taxa de produção volumétrica de metano. Esse valor foi, então, multiplicado pelo poder calorífico inferior (PCI) do metano, que equivale a 9,9 kWh_q/Nm³, conforme informação reportada por Al Seadi *et al.* (2008), fornecendo a quantidade de energia química associada ao biogás produzido na ETE.

Para quantificar os potenciais energéticos inerentes ao lodo e à espuma, adotaram-se os teores médios de sólidos totais de 20,00 e 13,24% (Ross *et al.*, 2013), respectivamente. Assim, calcularam-se as quantidades de matéria seca (em kg) disponíveis na ETE para os dois materiais. Na sequência, estimaram-se as quantidades de energia química associadas com o lodo e com a espuma por meio da multiplicação por seus respectivos PCIs (Possetti, 2013; Ross *et al.*, 2013).

A partir dos dados de consumo de energia por operação unitária e dos potenciais energéticos dos subprodutos gerados na ETE, construiu-se um diagrama de fluxo de energia (diagrama de Sankey). Para tanto, utilizou-se o programa computacional STAN, versão 2.5, da Universidade Tecnológica de Viena. Para assegurar consistência dimensional, as entradas e as saídas do diagrama de fluxo foram transformadas para uma mesma unidade: quantidade energia elétrica por ano. Para o cálculo da produção de energia elétrica a partir da combustão do lodo e da espuma, considerou-se que ambos os materiais encontram-se secos, com teor de sólidos superior a 80%, e que o rendimento para conversão da energia química para energia elétrica é de 10% (VAN HANDEEL, 2009). Para o biogás considerou-se um rendimento de 36% na conversão da energia química para a energia elétrica (DWA, 2013).

Por fim, realizou-se uma análise detalhada do consumo e do potencial de geração de energia na ETE com o intuito de avaliar sua autossustentabilidade energética. Investigou-se, dessa forma, a possibilidade de geração de energia elétrica para auto-consumo, bem como a possibilidade de geração de energia térmica para secagem do lodo e da espuma gerados na planta. Nesse caso, calculou-se a demanda energética necessária para operar um secador granular rotativo de lodos, considerando que cada quilograma de água a ser evaporada dos materiais úmidos demanda 1.000 kcal de energia térmica. A Tabela 2 resume os parâmetros dos subprodutos energéticos contemplados neste estudo.

Tabela 2: Propriedades dos subprodutos energéticos gerados pela ETE.

Material	Teor	PCI ¹	$\eta_{\text{elétrico}}$ ²	$\eta_{\text{térmico}}$ ³
Metano (biogás)	75,00% v/v	9,9 kWh _q /Nm ³	36%	80%
Lodo	20,00% ST	3.857 kcal/kg, em base seca	10%	75%
Escuma	13,24% ST	2.000 kcal/kg, em base seca	10%	75%

¹Poder calorífico inferior

²Coefficiente de rendimento para conversão de energia química em energia elétrica

³Coefficiente de rendimento para conversão de energia química em energia térmica

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta o diagrama de fluxo de energia construído para a ETE estudada. As operações unitárias que compõem a ETE estão representadas por retângulos brancos com bordas na cor preta, bem como o fluxo de esgoto encontra-se representado pelas setas na cor preta. As setas representadas na cor vermelha correspondem aos fluxos de energia elétrica que foram consumidos (*I – import flow*) pelas operações unitárias e as setas na cor verde pela energia elétrica que poderia ser gerada (*E – export flow*), caso os resíduos do tratamento fossem reaproveitados para tal fim. A espessura das setas é proporcional à quantidade de energia elétrica, cujos valores podem ser visualizados no interior das elipses brancas.

A ETE avaliada consumiu, em 2013, 1.369.358 kWh_e de energia elétrica. Deste valor, o pós-tratamento, composto por flotadores por ar dissolvido (FADs), foi responsável pelo consumo de aproximadamente 849.778 kWh_e, que corresponde a mais de 60% do consumo de energia no ano. A elevatória de recalque de esgoto bruto e o processo de desaguamento de lodo consumiram, no mesmo período, aproximadamente 380.403 kWh_e e 124.830 kWh_e, respectivamente. Esses processos juntos totalizaram cerca de 38% do consumo total de energia elétrica da ETE.

O gradeamento mecanizado, a desarenação e o sistema de higienização do lodo demandaram as menores quantidades anuais de energia elétrica, consumindo 3.285, 5.519 e 4.511 kWh_e, respectivamente. Ressalta-se, entretanto, que a estimativa do consumo do sistema de higienização do lodo levou em consideração o regime de operação e manutenção referente ao período avaliado, sendo o consumo total registrado aproximadamente 20% do consumo esperado em relação ao regime de operação do sistema de desaguamento de lodo.

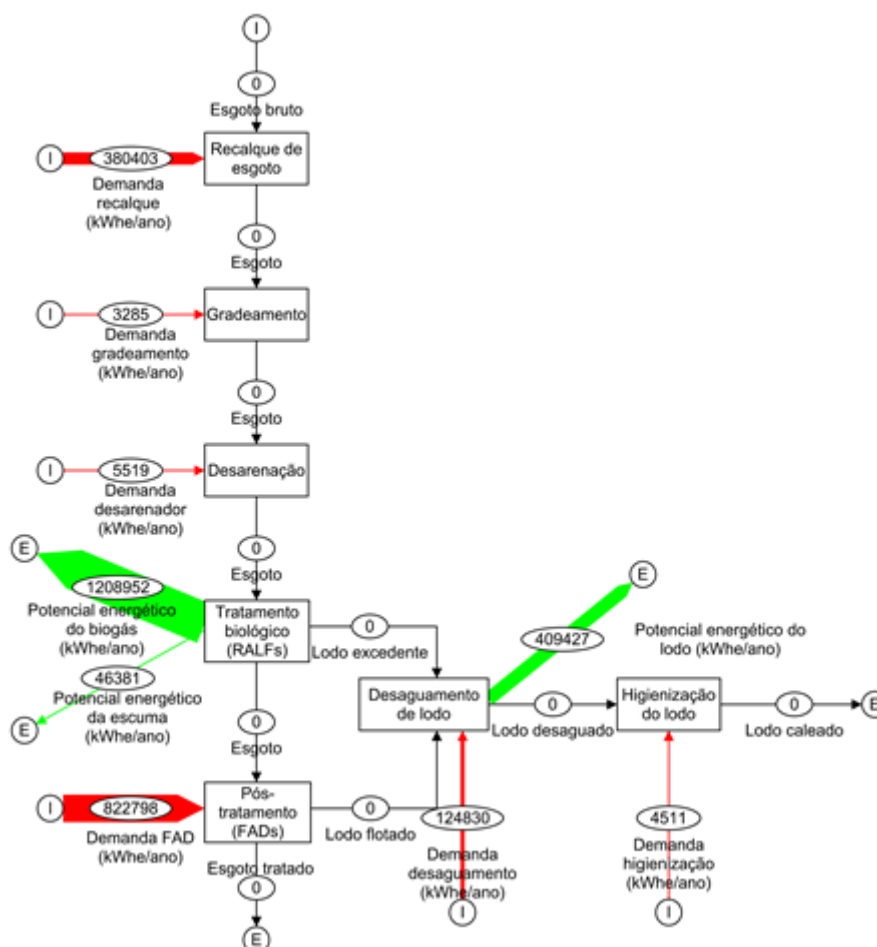


Figura 2: Diagrama de fluxo de energia elétrica da ETE estudada para o ano de 2013.

A ETE em questão produziu, em 2013, cerca 3.358.201 kWh_q na forma de biogás. Essa quantidade de energia poderia ser utilizada para produzir mais de 1.208.952,48 kWh_e/ano de energia elétrica, valor superior a 88% do consumo de energia elétrica da ETE, caso o biogás fosse utilizado como combustível em um motor ciclo Otto, por exemplo.

Por sua vez, o reaproveitamento energético da espuma removida dos reatores anaeróbios poderia disponibilizar, a partir da combustão do material seco (considerando um teor de sólidos totais de 85%), 463.810,00 kWh_q de energia química por ano, que geraria cerca de 46.381,00 kWh_e/ano. A quantidade potencial de energia química que poderia ser obtida a partir da queima do lodo (biomassa), caso ele fosse submetido previamente ao processo de secagem térmica (teor de sólidos totais acima de 80%), seria de, pelo menos, 4.094.279,35 kWh_q no ano. Assumindo o rendimento proposto na Tabela 2, poder-se-ia gerar a partir do lodo aproximadamente 409.427,94 kWh_e/ano.

Logo, conforme pode ser observado na Figura 2, a soma dos potenciais de geração de energia elétrica a partir do biogás, da espuma e do lodo seria suficiente para fornecer toda a energia elétrica consumida pela ETE em 2013. Além disso, poder-se-ia gerar um excedente de 21% sobre o que foi consumido no mesmo período. Neste cenário de reaproveitamento dos materiais, desconsiderou-se a energia térmica que seria necessária para a secagem prévia da espuma e do lodo antes de sua combustão para geração de energia elétrica.

Alternativamente, poder-se-ia utilizar a energia de cada material para a secagem térmica do lodo e da espuma gerados no processo de tratamento. Na geração da energia térmica a partir do biogás, seria possível gerar aproximadamente 2.686.561,06 kWh_q/ano. Seria possível ainda a geração de 347.857,50 kWh_q/ano e de 3.070.709,52 kWh_q/ano a partir da combustão da espuma e do lodo, respectivamente. Cabe destacar que, para

que o teor de sólidos totais desses resíduos chegasse a 80%, seria necessário o fornecimento de aproximadamente 4.059.181,18 kWh/ano para a secagem térmica do lodo e 1.610.918,13 kWh/ano para a secagem da espuma.

Logo, o reaproveitamento do biogás forneceria apenas aproximadamente 66% da energia requerida para secagem de todo lodo gerado em 2013 pela ETE estudada. No entanto, a energia térmica gerada a partir do lodo, da espuma e do biogás seria suficiente para secar todo lodo e toda a espuma gerados na ETE ao longo de 2013, com excedente energético de 445.028,77 kWh/ano que poderia ser utilizado para outros fins.

CONCLUSÕES

A aplicação da AFE permitiu identificar os consumos de energia por operação unitária da ETE sob investigação, bem como quantificar os potenciais de reaproveitamento energético do biogás, do lodo e da espuma. Verificou-se que o pós-tratamento com flotação por ar dissolvido é o principal consumidor de energia elétrica da ETE estudada, sendo responsável por cerca de 60% do consumo total da ETE em 2013. Além disso, foi possível identificar que o biogás possui o maior potencial de geração de energia elétrica e poderia ter fornecido no mesmo ano pelo menos 88% da energia consumida pela ETE.

Adicionalmente, constatou-se que com o reaproveitamento do biogás, do lodo e da espuma para geração de energia elétrica seria possível fornecer energia elétrica para a ETE e ainda produzir uma energia excedente de 21% sobre o que foi consumido em 2013. Entretanto, ainda seria necessária uma fonte de energia externa para secagem do lodo e da espuma, antes de sua combustão.

Determinou-se também que caso o biogás fosse utilizado para a secagem térmica do lodo, então ele não seria suficiente para secar todo o lodo produzido na ETE até o teor de 85% de sólidos totais, exigindo uma fonte complementar de energia para tal. No entanto, caso o biogás, o lodo e a espuma fossem recuperados para efetuar a secagem térmica de todo lodo e espuma gerados na ETE, então existiria energia suficiente para tal fim. Essa prática contribuiria consideravelmente para a redução do volume desses resíduos que necessitam de gerenciamento adequado e, geralmente, oneroso.

Como os valores aqui apresentados para a produção de biogás foram estimados e como os custos de implantação de sistemas de conversão de energia são altos, sugere-se a instalação de sistemas de medição de biogás na ETE a fim de quantificar os reais potenciais de aproveitamento desse material. Além disso, sugere-se que, ao calcular os potenciais de reaproveitamento de cada subproduto do processo de tratamento de esgoto, seja realizada a verificação preliminar dos rendimentos para conversão de energia, tendo em vista que esses valores podem variar de acordo com a tecnologia adotada para transformação da energia química em energia elétrica ou térmica.

Existem outras formas de se reaproveitar o potencial energético do lodo, da espuma e do biogás, sendo a cogeração uma delas. Essa técnica associa a geração de energia elétrica por meio da conversão da energia química do material em energia elétrica e a geração de energia térmica por meio do calor produzido com o primeiro processo. A cogeração não foi objeto deste trabalho, mas por ser atrativa recomenda-se que seja investigada em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KOTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. Biogas handbook. University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
2. BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Practical handbook of material flow analysis: Advanced methods in resource and waste management. Taylor & Francis e-Library, 2005.
3. DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources. 2 ed. Alemanha: Wiley-VCH, 2001.
4. DWA. Norma DWA-A 216: Verificação e análise energética – Instrumentos para a otimização energética de estações de tratamento de esgoto. Hennef, Alemanha: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V, 2013.

5. LIMA, P. L. Energia no tratamento de esgoto: Análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás. Dissertação (Mestrado em Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
6. LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. *Water Science & Technology*, vol. 66, pp. 2745-2753, 2012.
7. ORTEGA, F. H. M.; ROSA, F. B.; SOUZA, J. F. Geradores de água quente, Universidade Estadual de Maringá, 2002.
8. POSSETTI, G. R. C. Propriedades físicas, químicas e calorimétricas de lodos oriundos do processo de tratamento de esgoto doméstico na Sanepar. Curitiba: SANEPAR, 2013. 3 p. Informe técnico.
9. ROSS, B. Z. L.; CARNEIRO, C.; AISSE, M. M.; FROEHNER, S. Caracterização da espuma produzida em reatores anaeróbios de manta de lodo, estado do Paraná. Trabalho apresentado no 27. Congresso Nacional de Engenharia Sanitária e Ambiental, Goiânia, 2013.
10. SHIRADO, J.; POSSETTI, G. R. C.; CARNEIRO, C.; ROSS, B. Z. L.; AMARAL, K. J. Análise do fluxo de materiais em uma estação de tratamento anaeróbio de esgotos domésticos. In: Anais do 34. Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Monterrey, 2014.
11. TONINI, D.; GIANLUCA, D.; ASTRUP, T. F. Bioenergy, material, and nutrients recovery from household waste: Advanced material, substance, energy, and cost flow analysis of a waste refinery process. *Applied energy*, 121, 64-78, 2014.
12. VAN HANDEEL, A. Potencial de geração de energia a partir do lodo de sistemas de tratamento de esgoto. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v. 2, p. 125-142, 2009.