



CARACTERIZAÇÃO DO LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE) E ESTUDO SOBRE SEU POTENCIAL ENERGÉTICO

Erich Shen Higa Lee⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Ambiental – Universidade Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’ – UNESP/IGCE

Francisco José dos Santos (Orientador)

Prof. Dr. do Departamento de Física - Universidade Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’ - UNESP/IGCE

Endereço⁽¹⁾: Rua Vale Formoso, n°75, apto. 124, Bairro Santo Estevão, São Paulo/SP, CEP 03410-030. Fone: (011) 2941-7083. e-mail: ehiga_lee@yahoo.com.br

RESUMO

Este trabalho tem como principal meta avaliar as características físico-químicas do lodo de ETE e analisar seu uso como combustível para recuperação de energia através da sua queima, promovendo assim energia e redução do volume. Estuda-se o uso do biogás gerado na própria ETE, pelos reatores UASB (reatores anaeróbios de fluxo ascendente) para realizar a remoção da umidade do lodo (cerca de 80% de água) e tornar sustentável o processo de recuperação de energia. O lodo seco, pode ser utilizado como biomassa, com poder calorífico semelhante a madeira, sendo um ótimo combustível. Após a queima, as cinzas poderão ser incorporadas em blocos de cimento e/ou pela indústria de cerâmica ao invés de serem descartados. Analisa-se brevemente a questão dos gases gerados na queima do lodo e como mitigar a sua emissão na atmosfera. Dessa forma, será apresentado como o problema dos resíduos e poluentes gerados pelas ETE podem se tornar benéficos a sociedade e ao meio ambiente. Os resultados mostram a viabilidade do uso do lodo de ETE como alternativa energética.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de esgoto, Estação de tratamento de esgoto, Saneamento, Combustão, Energia

INTRODUÇÃO

A necessidade de tratar do esgoto urbano é fator importante para se manter a qualidade dos recursos hídricos e a saúde humana. O processo tratamento do esgoto ocorre nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e como subproduto gera-se um resíduo sólido conhecido como lodo.

O gerenciamento do lodo é um problema contemporâneo de preocupação mundial, devido às grandes quantidades geradas de matéria por dia. O assunto sobre a correta administração e gerenciamento dos resíduos de saneamento tem tamanha importância ambiental, econômica e social, que está contida na Agenda 21 dos países, estabelecida após a realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), em 1992 no Rio de Janeiro (ECO-92).

Segundo o IBGE, através da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada em 2008, apenas 55% do esgoto gerado é coletado e somente 68,8% dessa porcentagem é tratado. Segundo Pinto e Andreoli (2001), no Brasil a geração de lodo está estimada em 150mil a 220 mil toneladas de matéria seca por ano, mesmo considerando um dado obtido em 2001, são valores altos de produção de lodo que atualmente devem estar em maiores proporções.

As destinações finais para esse resíduo são comumente os aterros sanitários, aplicações na agricultura e incineração. Porém, devido ao grande volume de lodo produzido diariamente, aliados ao crescimento populacional e a tendência da universalização dos serviços de saneamento básico (PLANSAB), a quantidade gerada de lodo aumentará de tal forma que somente as aplicações tradicionais de destinação final do lodo serão inviáveis econômica e ambientalmente.

A liberalidade no uso dos aterros sanitários está com os dias contados com a aplicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305), que irá restringir, em 2014, a utilização dos aterros sanitários apenas para resíduos últimos, ou seja, aqueles que não são passíveis de nenhuma forma de reuso ou reciclagem.

A destinação para agricultura, apesar de ser a melhor forma atual de gerenciamento de lodo, também é problemática no sentido da necessidade de um tratamento extremamente rigoroso da qualidade do lodo, pois este pode conter substâncias químicas tóxicas e agentes patogênicos, que são prejudiciais a biota e a saúde humana.

A incineração de lodo também é bastante considerada para o gerenciamento do lodo, pois dispensa a exigência de um lodo previamente tratado biologicamente ou quimicamente e é um processo que propicia maior redução do volume do lodo. As desvantagens desse método são principalmente a geração de gases como óxidos de nitrogênio, furanos, dioxinas, gases ácidos, e a geração de cinzas, resultantes do processo de incineração.

A tabela a seguir demonstra objetivamente os pontos positivos e negativos dos métodos existentes.

Tabela 1: Tipos de disposição final: Prós e Contras (adaptado de Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2001)

Alternativa de disposição	Vantagens	Desvantagens
Incineração	Redução drástica de volume; Esterilização	Alto custo; gerenciamento das cinzas; e poluição atmosférica
Aterro Sanitário	Baixo custo	Necessita de grande área, distante de centro urbano; solo deve ser impermeável; produção de gases e lixiviado; dificuldade e demora para recuperação da área pós encerramento do aterro.
Disposição superficial no solo (landfarming)	Baixo custo; disposição de grandes volumes por unidade de área	Possível acumulação de metais pesados e/ou elementos de difícil decomposição no solo; possível contaminação do lençol freático; provoca mau odor; atração de vetores; dificuldade de reintegração da área
Recuperação de áreas degradadas	Alta taxa de aplicabilidade do lodo; resultados positivos sobre a reconstituição do solo e flora	Liberação de maus odores; limitação de composição do lodo para tal uso; possível contaminação da biota e do lençol freático
Reciclagem agrícola	Grande disponibilidade de áreas; efeitos positivos sobre solo; solução a longo prazo; potencial como fertilizante; resposta positiva das culturas em que é utilizado	Limitações referentes a composição do lodo e taxa de aplicação; contaminação do solo; contaminação dos alimentos; possível patogenicidade; e liberação de maus odores

Nesse cenário de grande urgência, novos estudos sobre a gestão do lodo estão sendo desenvolvidos, entre eles está a sua utilização como fonte de energia. Este trabalho visa estudar e caracterizar em laboratório as propriedades físico-químicas das amostras de lodo proveniente de ETE a fim de verificar sua utilização como fonte de energia e ao mesmo tempo promover uma solução alternativa à sua disposição final.

OBJETIVOS

Os objetivos principais deste estudo são:

- Caracterizar em laboratório as propriedades físico-químicas das amostras de lodo proveniente de ETE;
- Estudar a viabilidade do uso do lodo de ETE para a geração de energia pela queima, através de cálculos teóricos; e
- Estudar a viabilidade do uso do biogás do UASB para secagem do lodo.

METODOLOGIA UTILIZADA

Para o presente trabalho, as amostras foram obtidas pela coleta de lodo na Estação de Tratamento de Esgoto Jardim das Flores em Rio Claro – SP. Para analisar um possível efeito sazonal nas propriedades, foram coletadas amostras no início do mês de Fevereiro e no fim do mês de Maio, representando respectivamente a estação chuvosa e seca. Foram coletadas amostras de outra ETE, a Estação de Tratamento de Esgoto Barão Geraldo em Campinas – SP, a fim de analisar o efeito regional e comparar a qualidade do lodo.

Todas as amostras foram inicialmente caracterizadas quanto ao teor de umidade. As demais análises foram realizadas em base seca. As amostras foram secas em estufa a 105°C durante um período de 24 horas.

As análises referentes à determinação do teor de matéria volátil, do teor de cinzas e do teor de carbono fixo foram realizadas no Departamento de Física – UNESP/Rio Claro no Laboratório de Combustão, tomando como referência os procedimentos contidos nas normas ABNT/NBR 8290, ABNT/NBR 8289, ABNT/NBR 8299, respectivamente.

As análises dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre (CHN e S) foram realizadas pelo equipamento CHN 2400 Perkin-Elmer. Este método é baseado na oxidação completa da amostra (combustão) e análise dos gases liberados. As cinzas do lodo referentes às duas coletas realizadas na ETE Jardim das Flores foram analisadas para alguns metais como Cu, Zn, Cr, Pb e para Si e SiO₂, pelo método ICP-AES (espectroscopia de emissão atômica com plasma induzido) pelo equipamento Spectro Ciros CCD. As análises foram realizadas pela Central Analítica do Instituto de Química da USP.

Calculou-se o valor do poder calorífico superior e inferior (PCS e PCI respectivamente) das amostras usando-se os valores obtidos da análise de carbono e hidrogênio, com os valores de ROSE AND COOPER (1977) para o poder calorífico desses elementos. As equações utilizadas foram:

$$\bullet \text{ PCS} = \%C \times \text{PCS}_{\text{carbono}} + \%H \times \text{PCS}_{\text{hidrogênio}} \quad \text{Equação (1)}$$

$$\bullet \text{ PCI} = \%C \times \text{PCS}_{\text{carbono}} + \%H \times \text{PCI}_{\text{hidrogênio}} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

PCS: Poder calorífico superior (MJ/kg)

PCI : Poder calorífico inferior (MJ/kg)

%C: Teor de carbono na amostra expresso em porcentagem (%)

%H: Teor de hidrogênio na amostra expresso em porcentagem (%)

O cálculo de balanço energético da queima do lodo foi baseado na quantidade de energia para secagem de lodo e na quantidade de energia contida no lodo seco.

Cálculo da energia necessária para remover a água do lodo:

$$\bullet \Delta Q_{\text{água}} = M_{\text{água}} \times C_p \text{ água} \times (\Delta\theta) + L_{\text{água}} \times M_{\text{água}} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$\Delta Q_{\text{água}}$: Energia necessária para aquecer a água (MJ/kg)

$M_{\text{água}}$: Massa de água a ser removida (kg)

C_p água: Calor específico da água (4,184 kJ/kg °C)

$\Delta\theta$: Diferença entre as temperaturas final (100°C) e inicial (temperatura ambiente) da água (°C)

L água: Calor de vaporização da água (540 kJ/kg)

Cálculo da energia fornecida pela queima do lodo:

$$\bullet \Delta Q_{\text{lodo}} = M_{\text{lodo seco}} \times \{(\%C \times \text{PCS}_{\text{carbono}}) + (\%H \times \text{PCI}_{\text{hidrogênio}})\} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

ΔQ_{lodo} : Energia gerada pela queima do lodo seco (MJ/kg)

$M_{\text{lodo seco}}$: Massa do lodo seco (kg)

Cálculo da energia necessária para utilizar o lodo úmido para atingir temperatura de queima de 1100°C, temperatura escolhida para mitigar a formação de NOx, dioxinas e furanos. Nesse cálculo despreza-se a energia necessária para o aquecimento da massa de lodo, pois a energia necessária para seu aquecimento é muito pequena em relação a energia de aquecimento e vaporização da água somadas a energia de aquecimento do vapor de água até a temperatura final.

$$\bullet \Delta Q' = M_{\text{água}} \times C_p \text{ água} \times (\Delta\theta) + L_{\text{água}} \times M_{\text{água}} + M_{\text{água}} \times C_p \text{ vapor água} \times (\Delta\theta') \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

$\Delta Q'$: Energia para atingir temperatura de queima de 1100°C usando lodo úmido (MJ/kg)

C_p vapor água: Calor específico do vapor de água (2,1 kJ/kg °C)

$\Delta\theta'$: Diferença entre as temperaturas final (1100°C) e inicial (100°C) da água (°C)

Para calcular a energia contida no biogás utilizamos valores fornecidos pela Foz do Brasil, responsável pela operação da ETE Jardim das Flores. Com base nesses dados, temos:

Cálculo teórico da energia fornecida pela queima do biogás proveniente do reator UASB:

$$\bullet E_{\text{projeto}} = V_{\text{biogás projeto}} \times \text{PC}_{\text{biogás}} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

E_{projeto} : Energia fornecida pela queima do biogás produzido em um dia, utilizando volume de projeto (MJ/dia)

$V_{\text{biogás projeto}}$: Volume (estimado no projeto da ETE) de biogás produzido em um dia (m³/dia)

$\text{PC}_{\text{biogás}}$: Poder calorífico médio do biogás (25,09 MJ/m³)

$$\bullet V_{\text{biogás real}} = Q \times \text{DQO}_{\text{médio afluente}} \times E \times P_{\text{biogás}} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

$V_{\text{biogás real}}$: Volume real de biogás produzido diariamente pelo reator UASB (m³/dia)

Q: Vazão que chega a ETE (L/s)

$\text{DQO}_{\text{médio afluente}}$: Valor da carga de DQO que chega ao reator (mg/L)

E: Eficiência de remoção de DQO pelo reator UASB (53 %)

$P_{\text{biogás}}$: Produção de biogás em litros por quilo de DQO removida no reator UASB (100 L_{biogás}/kgDQO_{removida})

$$\bullet E_{\text{real}} = V_{\text{biogás real}} \times \text{PC}_{\text{biogás}} \quad \text{Equação (8)}$$

II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental

Onde:

E_{real} : Energia fornecida pela queima do biogás produzido em um dia, utilizando volume real (MJ/dia)

Cálculo da produção de lodo em um dia de operação da ETE Jardim das Flores, baseando-se no mês de agosto de 2011:

$$\bullet P_{\text{lodo úmido}} = P_{\text{lodo mensal}} \times 0,033 \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

$P_{\text{lodo úmido}}$: Produção de lodo úmido em um dia (kg/dia)

$P_{\text{lodo mensal}}$: Produção de lodo úmido em um mês (kg/mês)

Cálculo da quantidade de água presente no lodo úmido:

$$\bullet M'_{\text{água}} = P_{\text{lodo úmido}} \times 0,8 \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

$M'_{\text{água}}$: Massa de água presente no lodo úmido produzido em um dia de operação (kg/dia)

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Primeiramente, após a coleta das amostras de lodo das respectivas ETEs, realizou-se a análise imediata pelos métodos descritos anteriormente. Para obtenção dos valores médios apresentados na Tabela 2, foram utilizadas seis amostras de cada tipo de lodo, a fim de obter uma maior precisão nos dados. A Tabela 2 expressa os valores obtidos no período de pesquisa.

Tabela 2 – Valores médios da análise imediata das amostras de lodo.

	Lodo Fevereiro* (%)	Lodo Maio* (%)	Lodo ETE Barão (%)
Teor de Umidade	80±2	79,8±0,6	79,0±0,1
Teor de Matéria Volátil	60±1	62,4±0,7	48,2±0,3
Teor de Cinzas	36,2±0,5	33,8±0,6	42,7±0,1
Teor de Carbono Fixo	5±1	3,8±0,5	8,8±0,2

* ETE Jardim das Flores

A coleta de lodo realizada nos meses de Fevereiro e Maio na ETE Jardim das Flores baseou-se na suposição que o lodo poderia sofrer alguma alteração em suas propriedades devido à diferença de estações (verão e inverno), resultado de uma qualidade distinta do esgoto. Observando a Tabela 2, é possível verificar menores variações na caracterização do lodo da ETE Jardim das Flores com oscilações de 4, 7, 14% para matéria volátil, cinzas e carbono fixo, respectivamente. Para a amostra obtida da ETE Barão Geraldo, verificam-se diferenças da ordem de 20% em relação aos valores médios da caracterização do lodo da ETE Jardim das Flores. Tais diferenças devem-se provavelmente ao tipo de esgoto e variações operacionais no tratamento do esgoto.

A análise da composição das cinzas baseou-se na necessidade de se identificar os elementos constituintes, pois uma das possíveis alternativas que as cinzas do lodo podem receber é seu uso na incorporação de blocos de cimento, tijolos ou na indústria de cerâmica. Além disso, sabendo a composição das cinzas, torna-se possível promover medidas preventivas que reduzam a sua geração, diminuindo o potencial energético disponível. Sabendo dessas condições, a Tabela 3 a seguir mostra o resultado para a análise das cinzas do lodo da ETE Jardim das Flores.

Tabela 3 – Análise elementar das cinzas do lodo da ETE Jardim das Flores.

Elemento	Resultado médio (%)
Si	14,95±0,03
Zn	0,17±0,01
Cu	0,047±0,001

Elemento	Resultado médio (mg/Kg)
Cr	107,8±0,4
Pb	74,2±0,5

Com a finalidade de se realizar os cálculos da viabilidade do uso do lodo para recuperação de energia, é necessário saber a sua composição em termos de carbono e hidrogênio. A quantificação de nitrogênio e enxofre serve para estimar a quantidade de gases NOx e SOx gerados no processo de queima. Assim temos a Tabela 4 seguinte com os valores expressos em porcentagem de massa do lodo das respectivas ETE.

Tabela 4 – Análise elementar CHN e S do lodo.

	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)
Lodo Fevereiro*	27,31±0,4	3,95±0,04	4,26±0,01	1,93±0,03
Lodo Maio*	32,43±0,1	4,77±0,03	5,75±0,02	2,32±0,05
Lodo B. Geraldo	28,86±0,05	4,45±0,05	3,67±0,02	2,21±0,01

* ETE Jardim das Flores

Tabela 5 – Poder Calorífico dos Elementos

	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Hidrogênio	141,85	119,81
Carbono	34,03	-

Fonte: ROSE and COOPER, 1977

Observa-se na Tabela 4, para as análises de lodo referentes a fevereiro e maio (efeito sazonal), um aumento sistemático em todos os valores de CHN e S. Os aumentos verificados nas concentrações de C e H produzem um maior poder calorífico do lodo (Tabela 6) para o mês de maio. Tal variação deve-se ao efeito da temperatura média ambiente ($T_{\text{fevereiro}} = 24,1^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{maio}} = 17,5^{\circ}\text{C}$) sobre a eficiência de remoção de DQO do reator UASB. Os dados das temperaturas médias foram obtidos junto a Estação Metrológica do Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA/UNESP).

Utilizando dados da bibliografia para os valores de poder calorífico dos elementos (Tabela 5) e as porcentagens obtidas na Tabela 4, realizaram-se os seguintes cálculos baseados nas Equações (1) e (2) e os resultados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores calculados do poder calorífico do lodo (base seca).

	Poder Calorífico Inferior	Poder Calorífico Superior
Lodo Fevereiro*	14,02 MJ/kg	14,89 MJ/kg
Lodo Maio*	16,74 MJ/kg	17,80 MJ/kg
Lodo B. G**	15,15MJ/kg	16,13 MJ/kg

* ETE Jardim das Flores, **ETE Barão Geraldo

Sabendo dos valores referentes ao poder calorífico, deve-se avaliar se a queima será sustentada, ou seja, se o lodo sozinho possui energia suficiente para manter o processo de queima estabilizado e fornecer um excedente energético que será utilizado para geração de energia de outra natureza. Desse modo, considerando uma amostra de 1 kg de lodo em base úmida, tem-se:

II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental

- 0,8kg de água + 0,2kg de lodo

A energia necessária para secar o lodo, ou seja, para remover a água existente é segundo a Equação (3):

- $\Delta Q_{\text{água}} = 0,8 \times 4,184 \times 80 \text{ (kJ/kg } ^\circ\text{C)} + 540 \times 0,8 \times 4,18 \text{ (kJ/kg)}$
- $\Delta Q_{\text{água}} = \mathbf{2,07 \text{ MJ/kg}}$

Portanto são necessários 2,07 MJ/kg para remover toda a quantidade de água presente no lodo úmido. Agora deve ser verificado o quanto de energia será liberado pela queima do material seco do lodo, calculando-se a energia contida em 0,2 kg de lodo seco. Nesse cálculo serão utilizados os valores em porcentagem do lodo da ETE Barão Geraldo, pois o PCS e PCI apresentados representam valores medianos aos valores dos lodos da ETE Jardim das Flores referentes aos meses de Fevereiro e Maio. Segundo a Equação (4) tem-se:

- $\Delta Q_{\text{lodo}} = 0,2 \times \{ (0,288 \times 34,03 \text{ (MJ/kg)} + 0,045 \times 119,81 \text{ (MJ/kg)}) \}$
- $\Delta Q_{\text{lodo}} = \mathbf{2,10 \text{ MJ/kg}}$

Com posse desses dados, pode-se afirmar que o lodo pode, apenas, fornecer a energia necessária para remover a quantidade de água existente.

Realizando uma estimativa de quanto de energia será necessária para queimar o lodo úmido a uma temperatura de queima de 1100°C (1376 K), temos pela Equação (5):

- $\Delta Q' = 0,8 \times 4,184 \times (100-25) + 540 \times 4,184 \times 0,8 + 0,8 \times 2,1 \times (1000-100)$
- $\Delta Q' = \mathbf{3,57 \text{ MJ/kg}}$

São necessários 3,57 MJ/kg de energia para elevar a temperatura de queima o lodo sem a remoção prévia de sua umidade. Com base nesses dados, torna-se claro que para o aproveitamento energético do lodo, ele deve passar por algum processo que remova parte ou toda a água presente em sua composição que forneça a diferença de 1,47 MJ/kg adicional.

Uma alternativa para esse problema é a utilização do biogás gerado na própria ETE, nos reatores anaeróbios, que são normalmente descartados sem que ocorra um aproveitamento da sua energia. Dessa forma, obtiveram-se dados reais de geração de biogás e de produção diária de lodo para realizar os seguintes cálculos, estudando a possibilidade de se utilizar a energia do biogás para secagem do lodo. Assim temos, com base nos dados fornecidos pela Foz do Brasil, referente à ETE Jardim das Flores:

- Produção de biogás (projeto da ETE): 420m³ biogás/dia
- Constituição do biogás: 60% de metano
- DQO afluente a ETE: DQO_{mínimo} = 534 mg/l; DQO_{médio} = 645 mg/l; DQO_{máximo} = 728 mg/l
- Remoção diária de DQO no UASB: 53%
- Produção de lodo com 80% de umidade: 115,72 ton/mês (dado de agosto 2011)
- Poder calorífico do biogás = 5000 a 7000 kcal/m³

Com estas informações temos segundo a Equação (6):

- $E_{\text{projeto}} = 420 \text{ (m}^3\text{/dia)} \times 25,09 \text{ (MJ/m}^3\text{)}$
- $E_{\text{projeto}} = \mathbf{10.537 \text{ (MJ/dia)}}$

O volume real do biogás gerado é obtido segundo a Equação (7).

- $V_{\text{biogás real}} = 132(\text{L/s}) \times 645(\text{mg/L}) \times 0,53 \times 100(\text{L}_{\text{biogás}}/\text{kgDQO}_{\text{removida}}) \times 10^{-6}(\text{kg/mg}) \times 86400(\text{s/dia})$
- $V_{\text{biogás real}} = 389.873,088 (\text{L}_{\text{biogás}}/\text{dia}) \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{L})$
- **$V_{\text{biogás real}} = 389,873 (\text{m}^3/\text{dia})$**

Pela Equação (8) tem-se:

- $E_{\text{real}} = 389,873 (\text{m}^3/\text{dia}) \times 25,09 (\text{MJ/m}^3)$
- **$E_{\text{real}} = 9.785 (\text{MJ/dia})$**

A energia obtida pelo dado de projeto de produção de biogás é um pouco superior ao dado real produzido de biogás calculado a partir da carga DQO que chega à estação, considerando a vazão de tratamento e eficiência do UASB de produção de biogás. Considerando a energia E_{real} , deve-se comparar com a energia necessária para secar o lodo produzido com 80% de umidade em um dia de operação. Assim estima-se de acordo com as Equações (9) e (10):

- $P_{\text{lodo úmido}} = 115,72 (\text{ton/mês}) \times 1000 (\text{kg/ton}) \times 0,033(\text{mês/dia})$
- **$P_{\text{lodo úmido}} = 3,86 \times 10^3 (\text{kg/dia})$**
- $M'_{\text{água}} = 3,86 (\text{ton/dia}) \times 1000 (\text{kg/ton}) \times 0,8$
- **$M'_{\text{água}} = 3,09 \times 10^3 (\text{kg/dia})$**

Desse modo, a energia diária necessária para remoção da água é calculada pela Equação (3):

- $\Delta Q'_{\text{água}} = 3,09 (\text{ton}) \times 1000 (\text{kg/ton}) \times 4,184 \times 80 (\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}) + 540 \times 3,09 \times 1000 \times 4,18 (\text{kJ/kg})$
- **$\Delta Q'_{\text{água}} = 8.009 (\text{MJ/dia})$**

Desse modo, a energia necessária para secar a quantidade de água presente no lodo produzido em um dia é 8.009 (MJ/dia) enquanto a energia fornecida pela produção real diária de biogás equivale a 9.785,74 (MJ/dia). Portanto é evidente que a utilização do biogás gerado nas dependências da ETE para secagem do lodo é viável, considerando os dados teóricos. Porém, para um estudo real, deve-se analisar a perda de energia que o equipamento que utilizará o biogás terá, pois nenhuma máquina possui 100% de eficiência, mas para o presente trabalho, o balanço teórico de energia já justifica o seu uso.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

O efeito sazonal sobre o lodo da ETE Jardim das Flores através da coleta de amostras em Fevereiro e Maio mostra um aumento significativo no conteúdo de carbono e hidrogênio da ordem de 20%. Esse resultado produz um aumento no poder calorífico do lodo (PCS) de 14,89 para 17,80 MJ/kg, e é coerente com a diminuição do conteúdo de cinzas de 36,2 para 33,8% e com a provável diminuição na produção de biogás, em função da temperatura.

O efeito regional analisado através da coleta de lodo na ETE de Barão Geraldo em Junho mostra valores próximos da média dos valores de Fevereiro e Maio das amostras de lodo de Rio Claro, e com PCS de 16,13 MJ/kg, mas com conteúdo de cinzas de 42,7%.

Variações tão significativas nas propriedades do lodo de ETE sugerem a necessidade de buscar mais dados sobre um período maior de tempo e relacionar as variações também com um estudo da região de coleta do esgoto. Portanto, com a pequena quantidade de amostragem feita no período desta pesquisa, não se pode ainda fazer generalizações sobre a qualidade e uso do lodo para os mesmos fins.



O poder calorífico do lodo seco apresentou valores em torno de 16MJ/kg, muito próximo aos de biomassas diversas como a madeira, 18MJ/kg, tornando-o viável para o uso como combustível para recuperação de energia; como afirmado por BORGES,SELLIN, MEDEIROS (2008) e RULKENS (2008).

Contribuindo para a questão do uso energético do lodo, as amostras apresentaram valores em torno de 50 a 60% de teor de matéria volátil. Essa matéria volátil é representada pela parcela orgânica da amostra que se volatiliza rapidamente na queima do lodo e é a parcela mais rica da amostra em termos energéticos. Deve-se tomar o devido cuidado em relação a mistura da amostra no reator onde ocorrerá a queima pois os gases combustíveis provenientes da matéria volátil são rapidamente volatizados, podendo escapar do reator na forma de fumaça, causando poluição indesejada para o processo.

A caracterização da composição das cinzas é importante para saber a fonte responsável pelo alto teor observado, e propor procedimentos para minimizar sua quantidade. A quantificação dos elementos presentes nas cinzas, como alguns metais pesados, serve para avaliar a viabilidade do seu uso na incorporação de blocos da construção civil e/ou na indústria de cerâmica. Comparando com a norma ABNT/NBR 10004 de 1987, os valores encontrados para chumbo e cromo estão dentro dos limites propostos. Para o melhor aproveitamento da recuperação de energia proveniente da combustão do lodo, é necessário conhecer detalhadamente o processo da origem e composição das cinzas a fim de propor medidas que reduzam a quantidade gerada.

A quantificação do teor de carbono fixo das amostras foi feita para analisar a quantidade de carbono que permanece na forma sólida e possui taxa mais lenta de combustão, permanecendo por um tempo maior no reator. Os valores encontrados representam cerca de 4 a 8% das amostras.

A utilização do biogás gerado na etapa de tratamento biológico da ETE nos reatores UASB, que é normalmente descartado (queima apenas para transformação do CH₄ para CO₂), é uma solução adequada para secagem e queima conjunta do lodo. O uso da energia do biogás gerado diariamente na ETE é suficiente para secar o lodo produzido por dia e ainda restar cerca de 1.776 MJ/dia. O lodo seco nas próprias dependências da ETE já teria seu volume reduzido, estando em condições favoráveis para sua utilização como biomassa para geração de energia.

Alternativamente ou de forma complementar, o lodo pode ainda ser queimado em consórcio com outros resíduos combustíveis, como cascas de arroz, serragem ou o próprio lixo urbano, visando além da recuperação de energia pelo aumento do poder calorífico, o gerenciamento dos demais resíduos sólidos.

Concluindo, o gerenciamento do lodo pode ser realizado de forma sustentável, transformando um resíduo de grande preocupação sanitária e econômica em algo produtivo para a sociedade e de baixo impacto ao meio ambiente. Como meta futura para este trabalho, que ainda está em andamento, pretende-se calcular os gastos energéticos que a ETE possui e realizar estudos de balanço energético envolvendo a quantidade de energia produzida pela queima do lodo e as necessidades energéticas da ETE. Desse modo, a ETE pode ser auto-sustentável energeticamente, possuindo baixo índice poluidor, já que seus próprios resíduos (subprodutos do tratamento de esgoto) servem como fonte energética e base para construção de outros materiais, além de realizar o tratamento do esgoto, preservando a qualidade da água dos corpos hídricos e da saúde humana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BORGES, F., SELLIN, N., MEDEIROS, S. H. W. **Caracterização e Avaliação de Lodos de Efluentes Sanitário e Industrial como Biomassa na Geração de Energia**. Ciência & Engenharia, v. 17, n. 1/2, p. 27, 2008.
2. BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2 de agosto de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em 02 de Junho de 2011.
3. ROSE, J.W., COOPER J.R. **Technical Data on Fuel**. The British National Committee, World Energy Conference, 1977.
4. RULKENS, W. **Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options**. Energy & Fuels, Vol. 22, No.1, 2008.