

Utilização do Biogás para a Secagem de Lodo e Geração de Energia Elétrica em uma Indústria Cervejeira

Diego Hamzagic Mendes

diego-mendes@uol.com.br

Eduardo Vargas Pereira

engeduardovargas@yahoo.com.br

Sebastião Cardoso

cardoso@unitau.br

Ederaldo Godoy Júnior

godoyjr@unitau.br

Departamento de Engenharia Mecânica, UNITAU – Universidade de Taubaté, Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica.

Resumo. Este trabalho apresenta uma alternativa para o uso racional do biogás de uma indústria cervejeira, produzido em um reator anaeróbio de fluxo ascendente. Este estudo faz uma análise teórica do aproveitamento do potencial energético do biogás para, através de motogeradores, transformar parte dessa energia em energia mecânica, destinando o restante para secagem do lodo gerado no reator. Um dos parâmetros que norteiam o trabalho é a quantidade de energia necessária para a secagem de todo lodo gerado pela estação de tratamento da indústria cervejeira. O balanço de energia do sistema permite avaliar o número de motogeradores necessários para produzir gases de descarga suficiente à secagem do lodo antes de enviá-lo para aproveitamento agrícola. No estudo da energia necessária à secagem do lodo, considerou-se a energia despendida no aquecimento da massa, acrescida da energia destinada à evaporação da água contida no lodo. Os resultados mostram que com um pequeno grupo de motogeradores é possível secar todo o lodo produzido pelo tratamento de esgotos e ainda gerar energia elétrica. O processo pode ser incorporado com facilidade ao sistema de tratamento da empresa e ainda reduzir os custos para destinação final do lodo.

Palavras - Chave: Biogás, Lodo de Esgoto, Secagem Térmica, Agricultura

Biogas Use to Dry Sludge of Water Treatment and Electricity Energy Generation in a Brewery Industry

Abstract. This article presents an alternative for the rational use of the biogas produced in an anaerobic reactor of ascending flow, of one it elaborates brewer. This study makes a theoretical analysis of the use of the energy potential of the biogas for through generating motor to transform part of that energy in mechanical energy, destining the remaining for drying of the mud generated in the reactor. One of the parameters that orientate the work is the amount of necessary energy for the drying of every mud generated by the treatment of the station brewer. The energy balance of the system allows evaluating the number of necessary generating motors to produce enough discharge gases to dry the mud, before to destine for agricultural use. In the study of the necessary energy to dry the mud, it was considered the energy spent in the heating of the mass, added of the energy destined to the evaporation of the water contained in the mud. The results show that with a small motor group generating is possible to dry the whole mud produced by the treatment of sewers, and still generate electric power. The process can be incorporate easily to the treatment system of the company and still reduce the costs final mud destination.

Keywords: *biogas, wastewater sludge, thermal drying, agriculture.*

1. Introdução

Especialistas em energia têm exortado a população e os governantes sobre a necessidade do uso adequado e racional das fontes existentes e estimulado a busca por energias não convencionais e ecologicamente corretas. A preocupação com a ecoeficiência, na qual pode-se assumir posições importantes pelo uso de tecnologias equilibradas que levam em conta a energia demandada pelo homem, e sua relação com o meio-ambiente deve figurar como prioridade em novos projetos. É evidente que o uso racional da água e o reaproveitamento máximo da energia, principalmente nas indústrias, favorecem não só o lado financeiro e econômico, mas também o lado ambiental tendo como foco principal o desenvolvimento sustentável permanente do homem no universo.

Sempre que houver matéria orgânica em decomposição, como no caso do efluente da indústria cervejeira, haverá potencialidade de se produzir biogás. Por falta de política adequada, grande parte do potencial energético representado pela produção do biogás fica comprometida. O biogás quando emitido pela decomposição da matéria orgânica como, por exemplo, em aterros sanitários, onde não é adequadamente coletado, provoca grande poluição no ar ambiente e, em determinadas concentrações, seu potencial explosivo coloca em risco a vida circunvizinha. Com o tratamento do gás para a geração de energia elétrica através de motogeradores, pode-se minimizar a dependência energética da indústria tendo como consequência direta a diminuição da emissão de gases para a atmosfera. É relevante ressaltar que a emissão de carbono regulamentada pelo Protocolo de Quioto, no que tange aos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), pode render ao Brasil cotas de emissões, as quais poderão ser trocadas por capital estrangeiro que, devidamente aplicadas, poderiam assegurar melhoria na situação econômica nacional. Ainda se pode gerar um comércio com esses gases, já que em grande parte da Europa e Ásia, a geração de energia com fontes alternativas não passam de projetos sem dotação de investimentos.

2. Reatores Anaeróbios

Os reatores anaeróbios são utilizados há muito tempo, devido à simplicidade de funcionamento para efluentes com elevada carga orgânica. De acordo com Neto (1994), em decorrência da ampliação de conhecimento na área, os sistemas anaeróbios de tratamentos de esgotos, notadamente os reatores de manta de lodo, ou seja, Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB), cresceram em maturidade, passando a ocupar uma posição de destaque no Brasil e no mundo. Essa trajetória de aceitação passou de um estágio de descrédito, até o início dos anos 80, para a fase atual de grande aceitação. Entretanto, esta aceitação ainda não está próxima da unanimidade, há ainda um grande número de profissionais que se posicionam firmemente contra os processos anaeróbios. Pode ser observado que, por trás da dessa rejeição, encontra-se muitas vezes uma visão preconceituosa e corporativa, associada à falta de conhecimento do processo. Essa falta de conhecimento leva a uma rejeição prematura de uma tecnologia já estabelecida (BARROS *et al*, 1995).

Em princípio, todos os compostos orgânicos podem ser degradados pela via anaeróbia, sendo que o processo se mostra mais eficiente e mais econômico quando os dejetos são facilmente biodegradáveis. A digestão anaeróbia também tem sido muito aplicada para o tratamento de efluentes de indústrias agrícolas, alimentícias e de bebidas, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento, entre elas, citam-se: abatedouros, frigoríficos, produção de álcool, processamento de batatas, cervejarias, produção de amido, processamento de café, curtumes, produção de fermento, processamento de frutas, laticínios, produção de refrigerantes, processamento de peixes, produção de açúcar, produção de vinhos, processamento de vegetais (GTZ – TBW, 1997).

Em relação ao tratamento de esgotos domésticos, tem-se verificado um enorme incremento na utilização da tecnologia anaeróbia (VON SPERLING, 1995), notadamente através dos reatores tipo UASB. O tratamento anaeróbio de esgotos domésticos torna-se bem mais atrativo para os países de climas tropicais e subtropicais, que são principalmente os países em desenvolvimento. Atualmente, diversas estações de tratamento anaeróbio já se encontram em operação no Brasil, no México e na Colômbia, enquanto, segundo GTZ-TBW (1997), grandes estações encontram-se em construção na Indonésia (Medan), Venezuela (Santa Cruz), Equador (Babahoyo) e Índia.

2.1. Características dos processos anaeróbios

As diversas características favoráveis dos sistemas anaeróbios, passíveis de serem operados com elevados tempos de retenção de sólidos e baixíssimos tempos de detenção hidráulica, conferem aos mesmos um grande

potencial para a aplicabilidade em tratamentos de águas residuárias de baixa concentração. São também tecnologias simples e de baixo custo, com algumas vantagens quanto à operação e à manutenção, conforme ilustrado na Tabela 1.

Nos sistemas anaeróbios, ocorre somente cerca de 40 a 50% de degradação biológica, com conseqüente conversão em CO₂. Verifica-se uma enorme incorporação de matéria orgânica como biomassa microbiana (cerca de 50 a 60%), que vem a se constituir o lodo excedente do sistema. O material orgânico não convertido em gás carbônico ou em biomassa deixa o reator como material não degradado (5 a 10%).

Tabela 1. Vantagens e Desvantagens dos Processos Anaeróbios

Vantagens	Desvantagens
Baixa produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios.	As bactérias são susceptíveis à inibição por um grande número de compostos.
Baixo consumo de energia, usualmente associada a uma elevatória de chegada. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos.	A partida do processo pode ser lenta na ausência de lodo de sementeira adaptado.
Baixa demanda de área.	Alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária.
Baixos custos de implantação, da ordem de 20 a 30 dólares per capta.	A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e precisam ser mais estudadas.
Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico.	Possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis.
Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses.	Possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável.
Tolerância a elevadas cargas orgânicas.	Remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos insatisfatórios.
Aplicabilidade em pequena e grande escala.	
Baixo consumo de nutrientes.	

Fonte: Chernicharo e Campos (1995); Von Sperling (1995), Lettinga, Hulshof e Zeeman (1996)

Nos sistemas anaeróbios, verifica-se que a maior parte do material orgânico biodegradável presente no despejo é convertida em biogás (cerca de 70 a 90 %). Apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), vindo a se constituir o lodo excedente do sistema. O material não convertido em biogás ou em biomassa deixa o reator como material não degradado (10 a 30%).

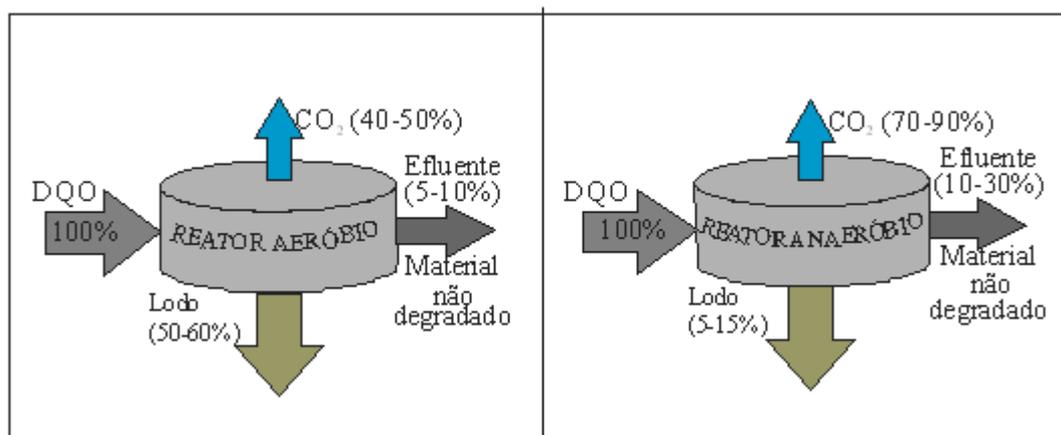


Figura 1. Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios (CHERNICHARO, 1997)

Conforme esquematizado na Figura 1, no efluente tratado dos reatores anaeróbios existe maior quantidade de materiais não degradados do que nos reatores aeróbios, mas, de acordo com Lettinga (1995), é necessário

escala plena, são muito bons. Entretanto, da mesma forma que em outros processos anaeróbios, os reatores de manta de lodo têm sido aplicados também para o tratamento de esgotos de baixa concentração, com resultados bastante promissores (CHERNICHARO, 1997). A Figura 3 apresenta alguns modelos de reatores anaeróbios.

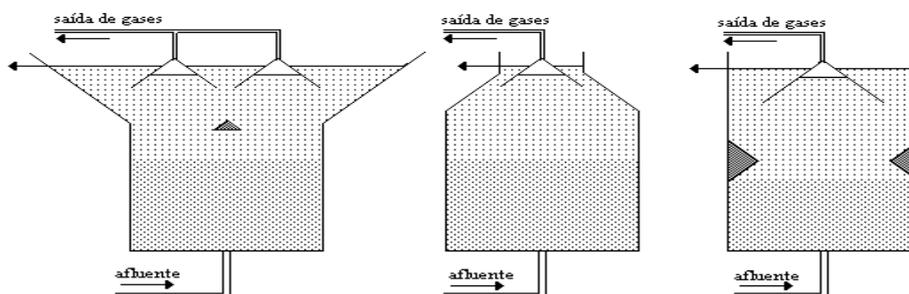


Figura 3. Esquemas de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (FERNANDES, 2007)

De acordo com Campos e Dias (1989), o processo de tratamento anaeróbio de efluentes com reatores que possuem manta de lodo, **começa** com a inoculação do reator com quantidades suficientes de lodo anaeróbio, iniciando-se em seguida a sua alimentação em baixa taxa no modo ascendente. Este período inicial é referido como *start up* ou partida do sistema, constituindo-se na fase mais importante da operação do reator. A taxa de alimentação do reator deve ser aumentada progressivamente, de acordo com o sucesso da resposta do sistema, ocorrendo, após alguns meses de operação, o desenvolvimento de um leito de lodo bastante concentrado, de 4% a 10%, ou seja, em torno de 40.000 a 100.000 mgST/L junto ao fundo do reator. O lodo é muito denso e com excelentes características de sedimentação. Pode ocorrer o desenvolvimento de grânulos de lodo (diâmetros de 1 a 5 mm), dependendo da natureza do lodo de sementeira, das características das águas residuárias e das condições operacionais do reator. Acima do leito de lodo desenvolve-se em uma zona de crescimento bacteriano mais disperso, denominada manta de lodo, em que os sólidos apresentam baixas velocidades de sedimentação. A concentração de lodo nessa zona usualmente varia entre 1,5 a 3 %. O sistema é automisturado pelo movimento ascendente das bolhas do biogás e do fluxo de esgotos através do reator. Durante a partida do sistema, quando a produção de biogás é usualmente baixa, pode-se tornar necessária alguma forma de mistura adicional como, por exemplo, através da recirculação do gás ou do efluente. A remoção do substrato ocorre **em** todo o leito e manta do lodo, embora esta seja mais pronunciada no leito de lodo (CARVALHO, 1994).

Com o movimento ascendente das bolhas de gás, ocorre o carregamento de lodo, sendo necessária a instalação de um separador trifásico (gases, sólidos e líquidos) na parte superior do reator, de forma a permitir retenção e o retorno do lodo. No entorno e acima do separador trifásico, configura-se uma câmara de sedimentação e o lodo mais pesado é removido da massa líquida e retornado ao compartimento de digestão, enquanto as partículas mais leves são perdidas do sistema juntamente com o efluente final. A Figura 4 representa o desenho esquemático de um reator UASB.

De acordo com Chernicharo (1997), a instalação do separador de gases sólidos e líquidos é que garante o retorno do lodo e a elevada capacidade de retenção de grandes quantidades de biomassa, de elevada atividade, sem a necessidade de qualquer tipo de meio de suporte. Como resultado, os reatores UASB apresentam elevados tempos de resistência celular (idade do lodo), bastante superiores aos tempos de detenção hidráulica, o que é uma característica dos sistemas anaeróbios. As idades de lodo verificadas em reatores UASB são usualmente superiores a 30 dias, propiciando que o lodo excedente descartado do sistema já se encontre estabilizado.

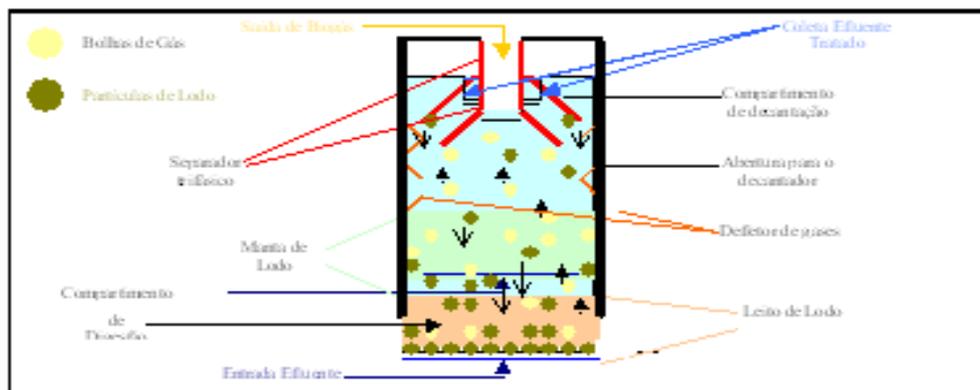


Figura 4. Desenho esquemático do reator anaeróbio UASB (CHERNICHARO, 1997)

De acordo com Foresti (1986), o reator de manta de lodo é capaz de suportar altas taxas de carga orgânica e a grande diferença, quando comparado com outros reatores da mesma geração, é a simplicidade construtiva e os baixos custos operacionais.

3. Lodo Produzido em Reatores Anaeróbios

O termo lodo tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos no tratamento de esgotos (VON SPERLING *et al.*, 2001). Nos processos biológicos de tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana, denominada genericamente de lodo biológico ou secundário, composto principalmente de sólidos biológicos e, por essa razão, também denominados biossólidos.

De acordo com Gonçalves *et al.* (2001), de maneira geral, são os seguintes subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgotos: material agregado; areia; espuma; lodo primário; lodo secundário; lodo químico (se houver a etapa físico-química). O tratamento de subprodutos sólidos gerados nas diversas unidades é uma etapa essencial do tratamento dos esgotos. Ainda que o lodo possa, na maior parte das etapas do seu manuseio, ser constituído de mais de 95% de água, apenas por convenção é designado por fase sólida, visando distingui-lo do fluxo do líquido sendo tratado, a fase líquida.

Ao se planejar o gerenciamento do lodo, os seguintes aspectos necessitam ser levados em consideração e quantificados:

- Produção de Lodo na fase líquida.
- Descarte de Lodo na fase líquida.
- Descarte de Lodo na fase sólida.

3.1. Processamento do lodo

O lodo de esgoto, conforme abordado anteriormente, necessita, para que todo o sistema de tratamento de efluentes seja considerado adequado, da correta gestão. Na Tabela 2 são demonstrados etapas de gerenciamento do lodo e seus objetivos.

Tabela 2. Principais etapas do gerenciamento do lodo (GONÇALVES, 2001; VON SPERLING, 2001)

Etapa	Descrição
Adensamento	Remoção de umidade (redução de volume)
Estabilização	Redução de matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)
Condicionamento	Preparação para a desidratação (principalmente mecânica)
Desaguamento	Remoção de umidade (redução de volume)
Higienização	Remoção de organismos patogênicos
Disposição Final	Destinação final dos subprodutos

De acordo com Gonçalves (1998), a incorporação de cada uma das etapas do processamento do lodo depende das características do lodo tratado, ou seja, do sistema de tratamento utilizado para a fase líquida, bem como da etapa de tratamento do lodo subsequente e da disposição final.

3.2. Secagem térmica do lodo

De acordo com von Sperling (2001), o processo de secagem térmica do lodo é uma das mais eficientes e flexíveis formas de redução do teor de umidade de “tortas” oriundas do desaguamento de lodos orgânicos domésticos e industriais disponíveis atualmente em uso. A redução da umidade a ser atingida pode ser controlada e o teor de sólidos do produto final depende da rota de disposição escolhida, citando-se como exemplos:

- Lodos destinados à incineração: necessitam de teores de sólidos entre 30 e 35% para garantir a operação autotérmica do incinerador.
- Lodos para disposição em aterros sanitários: aconselhável teor de sólidos em torno de 65%.
- Biossólidos destinados ao mercado agrícola com venda no varejo (utilização irrestrita): necessitam de teores de sólidos acima de 90%.

Em condições ideais, a entalpia de vaporização da água contida no lodo é da ordem de 2744 kJ. Em condições operacionais normais, este valor costuma ser acrescido em até 100% (VON SPERLING, 2001). A demanda total de energia dependerá da eficiência do equipamento escolhido e do tipo de lodo processado. Parte desta energia deverá vir de fontes externas, como óleo combustível, gás natural, etc. Para o caso de lodos anaeróbios, pode-se utilizar o biogás gerado no digestor como fonte auxiliar de energia. Os principais benefícios da secagem térmica do lodo são:

- Redução significativa do volume de lodo.
- Redução no custo de transporte e estocagem (quando for o caso).
- Produto estabilizado facilmente estocado, manuseado e transportado.
- Produto final praticamente livre de patógenos.
- Preservação das propriedades agrícolas do lodo.
- Não necessita equipamento especial para ser utilizado na agricultura.
- Pode ser incinerado ou disposto em aterro sanitário.
- Produto pode ser ensacado e distribuído pelo comércio varejista.

4. Biogás

O biogás é uma mistura gasosa resultante da degradação anaeróbia da matéria orgânica dos resíduos sólidos depositados em aterros sanitários e dos efluentes industriais e esgotos domésticos, sendo formado principalmente por metano e dióxido de carbono, em média em partes iguais. Quanto maior a formação de metano, mais energia por unidade de massa o biogás contém. Há ainda dezenas de substâncias, como o gás sulfídrico causador de mau cheiro, traços de siloxinas, que reduzem a vida útil dos equipamentos de uso energético, e vapor d'água (GOLDEMBERG, 2006).

De acordo com Etheridge (2003), o biogás gerado pela indústria cervejeira possui como valor mais conservativo o poder calorífico inferior na ordem de 20 MJ/Nm³, considerando assim que possui cerca de 60% de metano na composição total do gás.

5. Secagem do Lodo com a Utilização do Biogás Gerado pelo Reator

Dados obtidos na indústria cervejeira em análise mostram que o volume de biogás gerado é equivalente a 90.000 m³ por mês, que hoje são enviados a queimadores, não sendo aproveitado o potencial energético desse biogás. Para a geração do biogás, a empresa conta com um reator UASB, com capacidade máxima para tratar 585 m³ por hora de efluente. A estação de tratamento de efluentes industriais trabalha com Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO) real média de 1900 mg/L, bem abaixo da permitida (2600 mg/L).

Pela capacidade de realizar a digestão da matéria orgânica do efluente, o sistema além de gerar o biogás possui um outro subproduto, o lodo, que é gerado com média de 85 t/mês, o qual é encaminhado para a empresa que realiza o serviço de compostagem.

Para o fluxo de massa de lodo acima estabelecido, verifica-se que cerca de 118 kg/h de lodo devem ser tratados. Em natura, a massa de lodo contém cerca de 95% de água, porém, antes de ser submetido à secagem,

o material passa por uma centrífuga na qual a umidade é reduzida para um teor não superior a 78%; desta forma, utilizando a Eq. (1):

$$\dot{m} = \dot{m}_s + \dot{m}_a \quad (1)$$

$$\dot{m}_s = 5,9 \text{ kg / h} \quad (2)$$

$$\dot{m}_a = 112,1 \text{ kg / h} \quad (3)$$

onde:

\dot{m} - fluxo de massa total do lodo (kg/h)

\dot{m}_s - fluxo de massa sólida contida no lodo (kg/h)

\dot{m}_a - fluxo de massa de água contida no lodo (kg/h)

A massa d'água contida no lodo após passar pela centrífuga é da ordem de 78% da massa total, assim,

$$\dot{m} = 5,9 + 0,78 \cdot \dot{m} \quad (4)$$

$$\dot{m} = 26,82 \text{ kg / h} \quad (5)$$

$$\dot{m}_a = 0,78 \cdot 26,82 = 20,92 \text{ kg / h} \quad (6)$$

Portanto, a massa de lodo a ser seca pelo trocador de calor a cada hora é 26,82 kg, a qual está composta por 5,90 kg de massa sólida e 20,92 kg de massa de água. O secador deve atender a condições pré-estabelecidas para utilização do lodo na agricultura, segundo as quais a massa ao deixá-lo deverá possuir não mais que 8% de água. Assim, o volume o fluxo de massa que passará pelo secador é, conforme a Eq. (7):

$$\dot{m} = \dot{m}_s + \dot{m}_a \quad (7)$$

com:

$$\dot{m} = 5,90 + 0,08 \cdot \dot{m} \quad (8)$$

$$\dot{m} = 6,41 \text{ kg / h} \quad (9)$$

$$\dot{m}_s = 5,90 \text{ kg / h} \quad (10)$$

$$\dot{m}_a = 0,51 \text{ kg / h} \quad (11)$$

A massa total a ser processada no secador é 6,41 kg/h, porém, a massa de sólidos não irá variar, pois a secagem visa a parte líquida que será evaporada com a energia fornecida ao secador, desta forma, a massa a ser vaporizada do lodo será, conforme a Eq. 12:

$$m_{as} = 20,92 - 0,51 = 20,41 \text{ kg / h} \quad (12)$$

Com a diminuição do teor de umidade ao passar pelas centrífugas para 78% para se produzir uma massa sólida com não mais que 8% de umidade, o secador deverá vaporizar 0,0057 kg/s (20,41 kg/h). A potência necessária para atender à secagem prevista, conforme demonstrado na equação 13, de acordo com van Wylen

(2003), considerando que a entalpia de vaporização da água contida no lodo segundo Andreoli *et al*/(2001), é da ordem de 2744 kJ/kg,

$$\dot{W}_v = \dot{m}_v \cdot h_{fv} \quad (13)$$

$$\dot{W}_v = 15,56 \text{ kW} \quad (14)$$

Para o biogás que é gerado na estação de tratamento com poder calorífico inferior (PCI) da ordem de 20 MJ/Nm³ (ETHERIDGE, 2003), estimou-se a quantidade de energia obtida pela reação de oxidação, com uma parte sendo destinada à operação do moto gerador que libera gases para a atmosfera com temperatura superior a 450 °C.

A indústria em estudo produz atualmente 78 Nm³/h de gás, disponibilizando uma potência química calculada através da Eq. (15), da ordem de:

$$\dot{W}_q = \dot{V}_{bg} \cdot PCI_{bg} \quad (15)$$

$$\dot{W}_q = 988,89 \text{ kW} \quad (16)$$

Neste trabalho, não é estudada a queima direta do gás para secar o lodo, analisa-se a possibilidade da instalação de motogeradores para prover a indústria de energia mecânica, e o calor destinado à secagem é retirado dos gases de descarga dos motores de combustão interna.

O modelo de motogerador utilizado para queimar o gás possui uma potência nominal de 15 kW com geração de 54.000 kJ a cada hora, com um consumo estimado de 7,5 m³/h de gás (TRIGÁS Brasil – Fabricante do Motogerador). Sabendo-se que o volume gerado na ETE é de 120,97 m³/h de biogás, é possível colocar para trabalhar um grupo composto por 16 motogeradores.

Para secar todo o lodo gerado pela estação de tratamento da indústria cervejeira, avaliou-se a potência necessária (\dot{W}_s) pela soma da potência destinada ao aquecimento do lodo (\dot{W}_{aq}) com a potência necessária à evaporação da água (\dot{W}_v), portanto:

$$\dot{W}_s = \dot{W}_{aq} + \dot{W}_v \quad (17)$$

A potência necessária ao aquecimento da água é dada por:

$$\dot{W}_{aq} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (18)$$

O calor específico c_p refere-se ao lodo, e foi considerado que, no caso da cervejeira, o lodo é formado basicamente pela mistura de microorganismos e materiais orgânicos que, na sua maior parte, é formada por resíduos de cerveja. Assim sendo, foi considerado o calor específico (c_p) da mistura mosto de cerveja e seus componentes de fabricação, o qual, segundo Limoni e Venturini (1998), vale aproximadamente 3,764 kJ/kg K. A massa de lodo a ser aquecida é:

$$\dot{m} = 26,82 \text{ kg/h} \quad (19)$$

ΔT - corresponde à variação da temperatura do lodo desde a entrada no secador até atingir a temperatura de saturação da água para a pressão atmosférica local. Para $\Delta T = 80^\circ \text{C}$ tem-se:

$$\dot{W}_{aq} = 2,24 \text{ kW} \quad (20)$$

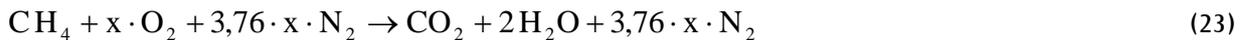
A potência necessária à secagem de acordo com as Eq. (14) e (17) é:

$$\dot{W}_s = 17,80 \text{ kW} \quad (21)$$

A potência disponível nos gases produto da combustão pode se calculada em função da massa dos gases de descarga (\dot{m}_d), composta pela massa de biogás (\dot{m}_{bg}) e massa de ar (\dot{m}_{ar}), conforme a Eq. (22):

$$\dot{m}_d = \dot{m}_{bg} + \dot{m}_{ar} \quad (22)$$

Como o biogás em geral tem composição variada, a análise deste tópico será feita para o metano (C H₄). A reação de oxidação suposta estequiométrica é dada pela Eq. (23):



e, portanto, na reação de oxidação acima, $x=2$
A relação ar combustível em massa é:

$$\text{RAC} = \frac{m_a}{m_{bg}} \quad (24)$$

$$\text{RAC} = 17,16 \quad (25)$$

Observa-se que a massa de descarga possui cerca de 17,16 quilogramas de ar para cada quilograma de metano que compõe a mistura.

A massa específica do metano, segundo Kazantsev (1977), é 0,7168 kg/Nm³, como cada grupo gerador consome 7,5 Nm³/h, a massa de metano admitida pelo motor é:

$$\dot{m}_{bg} = \rho_{bg} \cdot \dot{V}_{bg} \quad (26)$$

$$\dot{m}_{bg} = 5,38 \text{ kg/h} \quad (27)$$

A massa de ar admitida para mistura estequiométrica é:

$$\dot{m}_{ar} = 17,16 \cdot \dot{m}_{bg} \quad (28)$$

$$\dot{m}_{ar} = 92,32 \text{ kg/h} \quad (29)$$

$$\dot{m}_d = 97,7 \text{ kg/h} \quad (30)$$

A potência disponível no gás de descarga, tendo como base um único motogerador, é dada por:

$$\dot{W}_d = \dot{m}_d c_p \Delta T \quad (31)$$

De acordo com os dados obtidos com o fabricante, a temperatura de descarga dos gases queimados é 450°C, considerando uma queda de temperatura nos gases ao passar pelo trocador de 200 °C,

$$\dot{W}_d = \dot{m}_d c_p \Delta T \quad (32)$$

$$\dot{W}_d = 6,08 \text{ kW} \quad (33)$$

6. Conclusão

De acordo com os resultados obtidos, é possível secar todo o lodo gerado pela indústria com apenas três motogeradores, e ainda produzir energia elétrica para a estação de tratamento com potência de 45 kWh. Cabe lembrar que o volume de biogás gerado pelo tratamento dos efluentes pode alimentar cerca 16 motogeradores com potência total de 248 kWh e ainda secar um volume de lodo maior.

Os volumes de biogás e lodo são proporcionais, com o aumento do volume de lodo. Em condições normais de operação, o volume de biogás irá aumentar, portanto, se o volume de efluente crescer, para se secar o lodo deve-se utilizar um número maior de motogeradores.

O projeto possui fortes características de sustentabilidade, já que os subprodutos (resíduos) do processo são utilizados como combustível (biogás) e adubo (lodo seco), e ainda todo o processo pode ser desenvolvido dentro da empresa, na própria área da estação de tratamento de efluente.

A empresa, após o retorno dos investimentos, terá grande economia, podendo comercializar ou utilizar na própria indústria seus subprodutos, entre eles, o adubo e a energia nobre (mecânica) disponibilizada pelos motogeradores.

7. Referências

AISSE, M. M. et al. Tratamento final do lodo gerado em reatores anaeróbios. In: CAMPOS, J. R. (org.) Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Local de edição?: PROSAB, 1999. p. 271-300.

ANDRADE NETO, C. O. **Pesquisa referente à experiência brasileira relativa a sistemas de baixo custo para tratamento de águas residuárias**, Relatório Final, Vol. 1. Local de edição: editora ou entidade responsável, 1994. 228 p.

ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F.; VON SPERLING, M. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG/ Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484 p.

BARROS, R. T. V. et al. **Manual de saneamento e proteção ambiental para os municípios – Volume 2: saneamento**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1995. 221 p.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios de tratamento biológico de águas residuárias – Volume 5: reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1997. 246 p.

CHERNICHARO, C. A. L.; CAMPOS, C. M. M. **Tratamento anaeróbio de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 65 p.

ETHERIDGE, S. P. **Biogas use in industrial anaerobic wastewater treatment**. Energy from Biogas, São Paulo: CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, 2003. pp. 23 –24.

FERNANDES, C. **Reatores UASB**. 2007. [online] Disponível em: <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/UASB01.html>.

GONÇALVES, R. F. Opções tecnológicas para minimização da produtividade de lodos de esgoto no Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1., 1998, Local?. **Anais...** Local: entidade responsável, 1998. pp. 41-45.

GTZ-TBW. Promotion of anaerobic technology for the treatment of municipal and industrial sewage and wastes. Supraregional sectoral project, 1997. (referência incompleta. Informar qual tipo de documento – se revista, colocar nome, v. e n.; se livro, informar local de edição e editora)

KAZANTSEV, I. E. **Industrial Furnaces**. Moscow: Mir Publishers, 1977. 375 p.

LETTINGA, G. **Introduction**, International course on anaerobic treatment. Wageningen: Wageningen Agricultural University/IHE Delft., 1995.

LETTINGA, G.; HULSHOF Pol L. W. E.; ZEEMAN, G. **Biological wastewater treatment – Part 1: anaerobic wastewater treatment**. [Lecture Notes]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1996.

LIMONI FILHO, G.; VENTURINI FILHO, W. G. **Avaliação energética da substituição do arroz partido por xarope de maltose em cervejaria**. Botucatu: FCA/UNESP, 1998. pp. 13 – 22.

SOUBES, M. Microbiología de la digestión anaerobia. In: TALLER Y SEMINARIO LATINOAMERICANO: TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES, 3., 1994, Montevideo. **Anais...** Montevideo. 1994. pp. 15-28.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNACKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**, 6 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher , 2003. 577 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1995. 240 p.

ZEHNDER, A. J. B.; INGVORSEN, K.; MARTI, T. **Micorbiology of the methane bacteria**, Anaerobic digestion 1981. Amsterdam: Elsevier Biomedical Press, 1982.

8. Direitos Autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso, incluído no seu trabalho.