



Vol. 2, No. 1, 125-142, 2009
ISSN 0718-378X

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO LODO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Adrianus van Haandel¹

*Potential power generation from sludge systems for
wastewater treatment*

ABSTRACT

All waste water treatment systems generate sludge, composed mainly of organic material. The amount of generated sludge per unit mass of organic material depends on the nature of the treatment system (aerobic or anaerobic), on the composition of the organic material in the influent and on the operational conditions. In order to convert the chemical energy of sludge into useful forms of energy there are basically two ways: (1) anaerobic digestion and use of the biogas or (2) thermal processes: direct combustion, pyrolysis or gasification. Na analysis shows that anaerobic digestion is preferable to thermal processes when the objective is generation of electrical power. The energy that can be generated from excess sludge in aerobic processes is clearly insufficient to cover the demand of energy for aeration and heat to evaporate the water of sludge cake before application of thermal processes. In anaerobic systems the potential of energy generation is higher and the demand is lower. At least in theory anaerobic system can be self sufficient in trms of energy by using the sludge. The contribution of thermal processes is relatively inexpressive and its application is only justified when it is necessary to reduce the mass of produced sludge to make transport and final destination feasible.

Keywords: Biological sludge, energy generation, anaerobic digestion, incineration, pyrolysis, gasification

Contact Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande
R Aprígio Veloso 882 58.109- 970 Campina Grande PB; prosab@uol.com.br

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO LODO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Adrianus van Haandel

Contact Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande
R Aprígio Veloso 882 58.109- 970 Campina Grande PB; prosab@uol.com.br

Resumo

Todos os sistemas de tratamento biológico de águas residuárias geram lodo que se compõe em grande parte de material orgânico. A quantidade de lodo gerado por unidade de massa de material orgânico depende da natureza do sistema de tratamento (aeróbio ou anaeróbio), da composição do material orgânico e das condições operacionais (idade de lodo e temperatura). Para converter a energia química do lodo em energia útil têm-se em princípio dois caminhos: (1) aplicação da digestão anaeróbia e uso do biogás gerado ou (2) processos térmicos: combustão direta, pirólise ou gaseificação.

Uma análise mostra que a digestão anaeróbia é preferível aos processos térmicos quando o objetivo é geração de energia elétrica. A energia que pode ser gerada com lodo de sistemas aeróbios é claramente insuficiente para atender a demanda de energia elétrica para aeração e de calor para evaporação de água de torta de lodo antes da aplicação de processos térmicos. Em sistemas de tratamento anaeróbio o potencial de geração de energia é maior que em sistemas aeróbios e a demanda de energia é menor. Ao menos teoricamente os sistemas anaeróbios podem se tornar autosuficientes em termos energéticos pelo uso do lodo. A contribuição de processos térmicos de lodo é relativamente inexpressiva e sua aplicação somente se justifica quando é necessário reduzir a massa de lodo para viabilizar transporte e destinação final do lodo.

Palavras chave : Lodo biológico, geração de energia, digestão anaeróbia, incineração, pirólise, gaseificação

Introdução

Uma das finalidades do tratamento de esgoto doméstico é a remoção do material orgânico que, quase invariavelmente, é feita através de processos biológicos. Em sistemas biológicos de tratamento de esgoto normalmente as bactérias são as responsáveis pela remoção da matéria orgânica, sendo, em sua maioria, heterotróficas, o que significa que usam o material orgânico como fonte material e também como fonte de energia. O resultado da atividade metabólica em sistemas de tratamento de águas residuárias é invariavelmente que cresce uma massa de sólidos, o lodo. Para evitar a descarga de lodo no efluente é necessário que se dêem descargas periódicas do lodo de excesso.

O lodo de excesso normalmente é descarregado como uma suspensão fluída com poucos sólidos (na faixa de 2 a 5 %). Se o lodo foi gerado em ambiente aeróbio (o que geralmente vai ser o caso) ele pode ser submetido a um processo de estabilização pelo processo de digestão anaeróbia. Neste processo parte do lodo é convertida em metano que pode ser usado para produzir energia útil, enquanto a parte que não é transformada pode ser desidratada e secada. Processos mecânicos como centrifugação ou filtração podem aumentar a fração de sólidos para aproximadamente 20 %. Se se deseja uma fração de sólidos mais alta é necessário remover umidade por evaporação usando-se processos térmicos em leitos de secagem ou outras unidades que consomem energia. O sólido resultante pode ser usado numa variedade de processos térmicos, pelos quais se procura transformar a energia química dos sólidos voláteis em produtos úteis. Pela combustão direta ou incineração grande parte do material volátil é transformada em produtos gasosos de combustão e há liberação de calor que pode ser usado para produzir vapor que por sua vez pode ser usado para gerar energia numa turbina.

Todavia a geração de energia a partir de um combustível sólido é relativamente ineficiente, com uma eficiência de conversão que dificilmente excede os 10 %. Para aumentar a eficiência de conversão podem-se aplicar processos térmicos preparatórios que transformam o material sólido em produtos líquidos ou gasosos combustíveis e que então podem ser alimentados a motores de explosão com geradores de energia elétrica acoplados. Na pirólise, um processo que se desenvolve na faixa de 400 a 800 °C, o produto principal da decomposição é um óleo combustível, mas parte do material volátil se transforma em carbono. Os dois produtos têm várias aplicações. Na gaseificação, que se desenvolve a temperaturas acima de 800 °C, o material volátil se transforma em produtos gasosos, principalmente gás de síntese ($H_2 + CO$), que além de combustível em motores de explosão pode ser usado para uma série de processos químicos, gerando vários produtos.

Hoje há pouquíssimos sistemas de pirólise ou gaseificação em operação no mundo, porque o custo de implantação e de operação é alto. Comparativamente a combustão ou incineração é mais aplicada porque tem custo menor e gera menos produtos laterais, mas a produção de energia também é menor e praticamente se limita à produção de energia elétrica. No futuro a aplicabilidade de pirólise e gaseificação há de aumentar, porque os avanços tecnológicos tendem a diminuir os custos e aumentar a eficiência de obtenção de produtos úteis.

Outros aspectos importantes são que o preço de energia e os custos de disposição final de lodo tendem a crescer vertiginosamente, de modo que é importante que minimizar a massa de lodo final.

No presente trabalho apresenta-se um método para estimar a massa e a energia que podem ser geradas a partir de lodo de sistemas de tratamento de águas residuárias. Para estimar a produção de lodo usa-se como ponto de partida o modelo da Associação Internacional de Água, IWA (Henze et al, 1986) para sistemas de tratamento aeróbios. Mostra-se que a energia que

pode ser gerada em sistemas aeróbios não é suficiente para tornar o sistema de tratamento independente de energia externa. O trabalho mostra ainda, que é bem mais eficiente e econômico aplicar a digestão anaeróbia do que processos térmicos de geração de energia. Sistemas de tratamento anaeróbios são podem ser autosuficientes em termos de energia. Para estimar a produção de lodo em sistemas anaeróbios se usou um modelo empírico desenvolvido por Cavalcanti e van Haandel (2003).

Metabolismo bacteriano e geração de lodo

Quando a bactéria usa o material orgânico como fonte material este é transformado em massa celular, num processo chamado de anabolismo ou assimilação. O anabolismo não ocorre espontaneamente: seu desenvolvimento depende da disponibilidade de energia química para a bactéria. Essa energia é liberada quando a bactéria transforma parte do material orgânico em produtos estabilizados. A natureza dos produtos estabilizados depende do tipo de bactéria e do ambiente prevalecente no sistema de tratamento: Num ambiente aeróbio predomina a transformação do material orgânico em dióxido de carbono e água, enquanto que num ambiente aeróbio se forma biogás, composto principalmente de metano e dióxido de carbono. Os oxidantes naturalmente encontrados em sistemas biológicos de tratamento de esgotos são oxigênio, nitrato e sulfato. No processo oxidativo a quantidade de energia é grande, da ordem de 13,8 kJ/gDQO (Van Haandel e Lettinga, 1994). Em comparação, na digestão anaeróbia que se desenvolve em sistemas anaeróbios, a produção de energia que acompanha a produção de biogás é pequena. A transformação do material orgânico em produtos é chamada de catabolismo ou desassimilação. A Figura 1 mostra esquematicamente a interligação entre o catabolismo e o anabolismo.

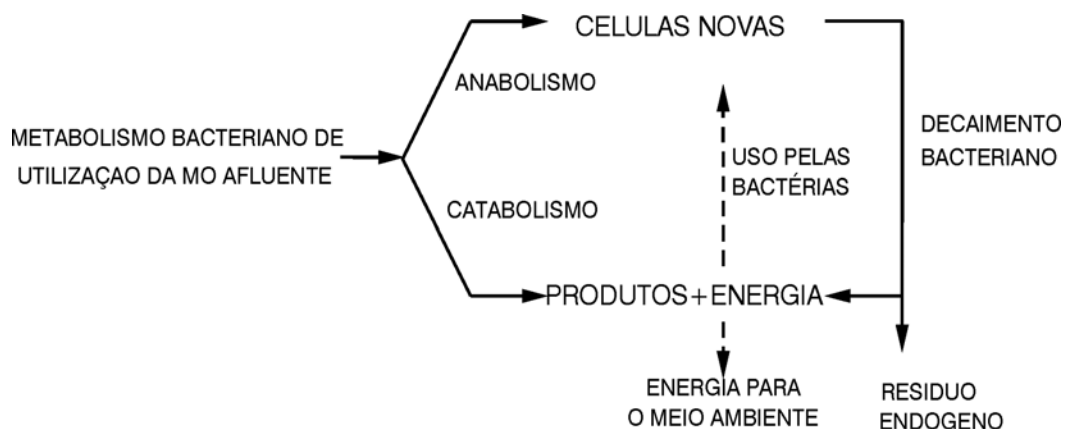


Figura 1 - Representação esquemática do metabolismo de bactérias heterotróficas.

Um outro aspecto do metabolismo bacteriano mostrado na Fig. 1 é o decaimento (morte) das bactérias que são gerados no sistema de tratamento: Parte da massa bacteriana que decai é

catabolizada enquanto um resto não biodegradável permanece no sistema como um resíduo não biodegradável (resíduo endógeno) até ser descarregado junto com a produção de lodo. Pesquisa mostrou que o decaimento em sistemas aeróbios (em torno de 1 % por hora; Marais e Ekama, 1976) é muito mais rápido que em sistemas anaeróbios (menos que 1 % por dia, Henze e Harremoos, 1983). Em sistemas aeróbios tanto o catabolismo de material orgânico do afluente como o catabolismo do lodo decaído resultam em consumo de oxigênio. Para distinguir as duas formas de consumo de oxidante são denominadas respiração exógena (material extracelular) e respiração endógena respectivamente (material celular).

A proporção entre a massa de material orgânico utilizada nos processos anabólico e catabólico depende da quantidade de energia liberada no catabolismo e da taxa de decaimento da massa bacteriana. Como o efeito energético do catabolismo oxidativo é muito mais expressivo do que o do catabolismo fermentativo a energia disponível para o processo anabólico é maior para as bactérias que usam o catabolismo oxidativo.

Por esta razão se observa que a produção de lodo por unidade de material orgânico metabolizada é muito maior em sistemas aeróbios que em sistemas anaeróbios. Por outro lado em sistemas aeróbios há também um decaimento de lodo mais expressivo do que em sistemas anaeróbios, o que reduz a produção se o tempo de permanência do lodo no sistema ou a idade de lodo é longo.

Os processos do metabolismo bacteriano em sistemas de tratamento resultam numa divisão em três frações do material orgânico do afluente (1) uma parte é anabolizada e transformada em lodo, (2) uma parte é catabolizada e transformada em produtos estáveis geralmente gasosos e (3) outra parte do material orgânico não é metabolizada e acaba descarregada no efluente.

No caso de sistemas de tratamento aeróbio existem expressões que permitem calcular o valor das frações de material orgânico e, portanto estimar a divisão do material orgânico em fração transformada em lodo, fração catabolizada (oxidada) e fração no efluente. Os valores das frações dependem da composição do material orgânico (as frações não biodegradáveis solúvel e particulada), da temperatura e da variável operacional fundamental, a idade de lodo.

A idade de lodo é o tempo de permanência do lodo no sistema de tratamento é a proporção entre a massa de lodo contido no sistema e a massa de lodo descarregada diariamente do sistema de tratamento. Na Fig. 2a se observa os valores numéricos a divisão das três frações em função da idade de lodo para as condições especificadas: frações não biodegradáveis do afluente $f_{us} = f_{up} = 0,1$ e temperatura = 25 °C. Os valores das frações foram calculados a partir do modelo de lodo ativado desenvolvido pela Associação Internacional de Água, IWA, (Henze et al 1986) que por sua vez é uma adaptação do trabalho clássico de Marais e Ekama (1976).

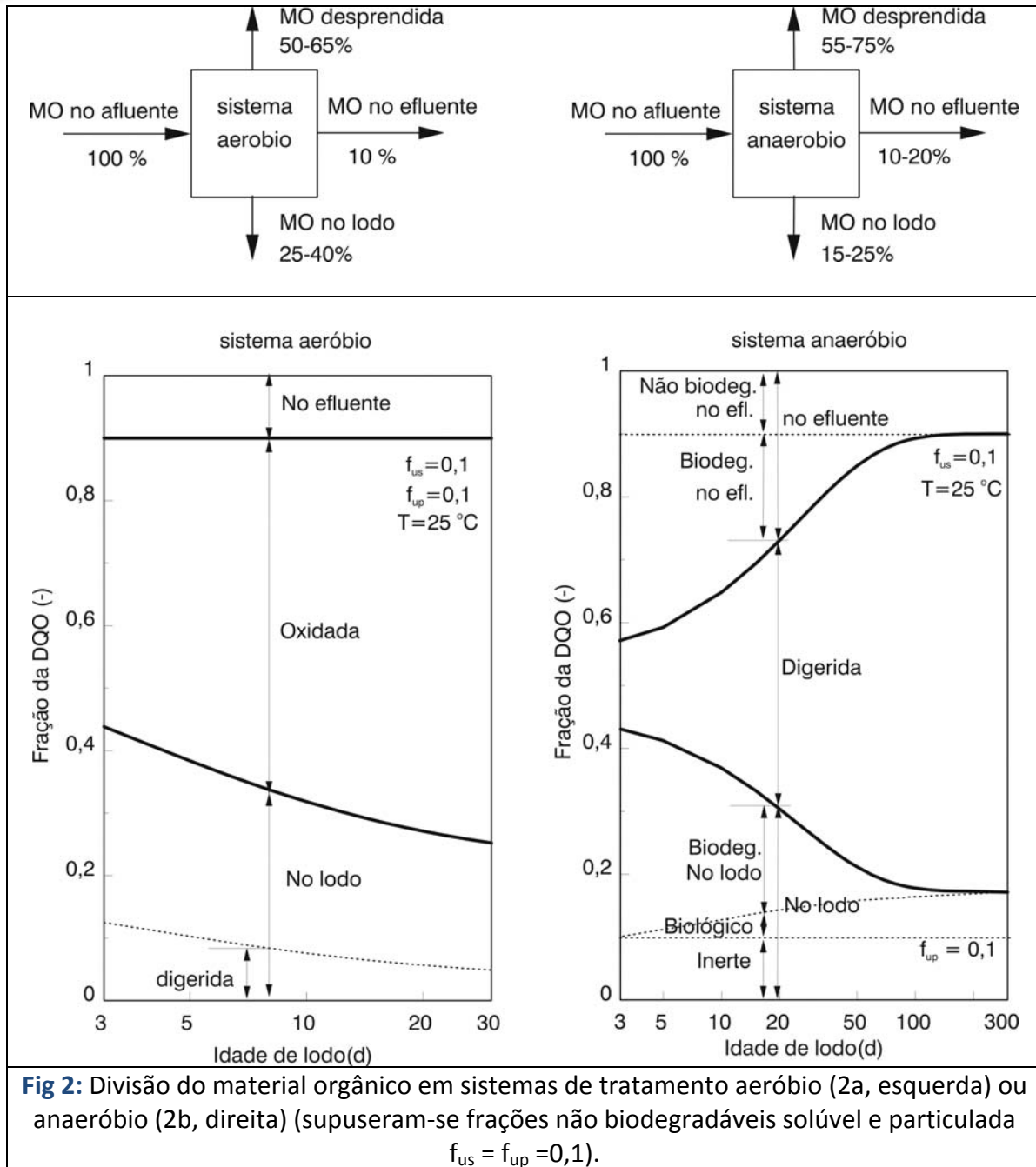
O lodo aeróbio produzido em sistemas aeróbios tende a se decompor pela digestão anaeróbia e ser transformado parcialmente em metano. Van Haandel e Marais (1999) desenvolveram um

modelo empírico que permita calcular a fração da DQO que pode ser transformada em metano pela digestão anaeróbia de lodo. A curva da fração digerida também está indicada na Fig. 2 em função da idade de lodo.

A Figura 2b mostra a divisão do material orgânico em suas três frações em sistemas anaeróbios. Neste caso a teoria do tratamento anaeróbio de águas residuárias ainda não é desenvolvida suficientemente para se dar expressões de aplicabilidade geral da divisão do material orgânico afluente. Cavalcanti e Van Haandel (2003) mostraram que em sistemas de tratamento anaeróbio o valor numérico das três frações depende dos mesmos fatores já identificados para o tratamento aeróbio: composição do material orgânico do afluente, temperatura e idade de lodo. Na Fig. 2b se observa as curvas da divisão do material orgânico em função da idade de lodo para $f_{us} = f_{up} = 0,1$ e uma temperatura de 25°C.

Ao se comparar as Figuras 2a e 2b os seguintes aspectos se tornam evidentes:

- (1) Em sistemas aeróbios a remoção do material orgânico é eficiente até para uma idade de lodo curta ($R_s = 3$ d). Em contraste em sistemas anaeróbios a eficiência só é essencialmente completa quando a idade de lodo é longa (> 100 d a 25 °C), o que mostra a importância de retenção de lodo no sistema de tratamento anaeróbio. Para valores baixos da idade de lodo haverá material orgânico biodegradável tanto no efluente como no lodo. Na prática pode não ser viável economicamente operar um sistema de tratamento anaeróbio a uma idade de lodo muito longa. Neste caso a remoção de material orgânico será apenas parcial com material biodegradável no efluente e no lodo de excesso do sistema.
- (2) O anabolismo em sistemas aeróbios é mais expressivo e por isso tendem a produzir bem mais lodo. Este lodo é instável, podendo ser digerido pela aplicação da digestão anaeróbia e o metano gerado assim gerado pode ser usado para a geração de energia elétrica que pode ser usada no próprio sistema de tratamento, por exemplo, para aeração.



(3) Como sistemas anaeróbios produzem menos lodo que os sistemas aeróbio, é mais fácil reter o lodo e operar a uma idade de lodo alta. Em adição a sedimentabilidade de lodo anaeróbio tende a superar a de lodo aeróbio, o que é outro fator que facilita a aplicação de uma idade de lodo longa.

- (4) Nos sistemas anaeróbios a fração biológica (a massa bacteriana) é uma fração relativamente pequena do lodo; frações maiores são o lodo inerte (gerado a partir do material orgânico não biodegradável e particulada) e, dependendo da idade de lodo, material biodegradável particulado floculado.

Geração de energia a partir de lodo

Tendo-se estabelecido o valor da fração de material orgânico do afluente que é transformada em lodo em um sistema de tratamento, pode se calcular a massa de lodo que é gerada. Sabendo-se ainda o valor energético da oxidação de lodo volátil, pode se estimar o potencial de produção de energia que se pode gerar a partir deste lodo seja para atender a demanda da própria planta de tratamento ou para venda externa. No caso de lodo aeróbio em princípio há duas possibilidades: (1) transformação de parte do lodo em metano mediante a digestão anaeróbia e (2) aproveitamento do lodo volátil no lodo para geração de energia seja por combustão direta ou por processos térmicos, pirólise ou gaseificação.

Geração de energia pela digestão anaeróbia de lodo aeróbio.

Van Haandel e Marais (1999) apresentaram as seguintes equações para a produção de lodo ativo e de lodo não ativo em sistemas de lodo ativado por unidade de massa de DQO aplicada:

$$mE_{va} = (1-f_{us}-f_{up})Y/(1+b_h R_s) \quad (1a)$$

$$mE_{vn} = (1-f_{us}-f_{up})f_b R_s Y/(1+b_h R_s) + f_{up}/f_{cv} \quad (1b)$$

$$mE_v = (1-f_{us}-f_{up})(1+f_b R_s)Y/(1+b_h R_s) + f_{up}/f_{cv} \quad (1c)$$

onde

mE_{va} = massa de lodo ativo por unidade de massa de DQO aplicada

mE_{vn} = massa de lodo inativo por unidade de massa de DQO aplicada

mE_v = massa de lodo volátil (ativo + inativo) por unidade de massa de DQO aplicada

f_{us} = fração do material orgânico afluente que é solúvel e não biodegradável

f_{up} = fração do material orgânico afluente que é particulada e não biodegradável

Y = coeficiente de rendimento do crescimento bacteriana

= 0,45 mgSVS/mgDQO (Ekama e Marais 1976)

f = fração de resíduo endógeno no decaimento de lodo ativo = 0,2 (Ekama e Marais 1976)

f_{cv} = proporção entre DQO e lodo volátil = 1,5 gDQO/gSVS (Ekama e Marais 1976)

b_h = constante de decaimento de lodo aeróbio = 0,24(1,04)^(t-10) por dia (Ekama e Marais 1976)

t = temperatura em °C.

R_s = idade de lodo do sistema de tratamento (d)

A redução de sólidos voláteis de lodo aeróbio num digestor anaeróbio depende basicamente de três fatores: (1) a temperatura de digestão; (2) o tempo de permanência no digestor e (3) a

natureza do material a ser digerido. Van Haandel e Marais apresentam expressões da fração de lodo digerido em digestores anaeróbios de lodo aeróbio. Esta fração varia dependendo da fração de lodo ativo (massa bacteriana viva) e é descrita com as seguintes expressões empíricas:

$$R_{da} = 0,67 t + 36 \quad (2a)$$

$$R_{dn} = 0,19 t + 10 \quad (2b)$$

onde:

R_{da} = fração da massa de lodo primário ou ativo convertida no digestor (em por cento)

R_{dn} = fração da massa de lodo inativo convertida no digestor.

A produção de metano está relacionada diretamente à redução de massa de sólidos voláteis. Sabe-se que no processo de digestão anaeróbia há conversão da DQO de material orgânico em DQO de metano. Tendo-se uma produção de lodo primário de mE_v kg SVS/kg DQO, com $(1-f_{av})mE_v$ de lodo não ativo e com $f_{av}mE_v$ de lodo ativo, então a fração da DQO convertida em metano pode ser expressa como:

$$mS_d = f_{cv}(R_{da}f_{av}mE_v + R_{dn}(1-f_{av})mE_v) \quad (3)$$

ou

$$\begin{aligned} mE_d &= mS_d/f_{cv} = (R_{da}f_{av}mE_v + R_{dn}(1-f_{av})mE_v) \\ mM_e &= mS_d/4 = 0,375(R_{da}f_{av}mE_v + R_{dn}(1-f_{av})mE_v) \end{aligned} \quad (4)$$

onde:

mS_d fração da DQO afluyente que é digerida.

mM_e massa de metano gerada por unidade de massa de DQO aplicada.

f_{av} fração ativa no lodo volátil = mE_{va}/mE_v

Uma das possibilidades de uso do metano gerado é a conversão em energia elétrica. A aeração de energia pode ser feita pela aplicação direta do biogás em um motor de ciclo Otto acoplado a um gerador de energia. Sabendo-se que o calor de combustão de metano é 50.400 kJ/kgCH₄ e que a eficiência de conversão da energia química do metano em energia elétrica é na faixa de $R_{el} = 35 \%$ pode se calcular a potência que pode ser produzida por unidade de massa de metano:

$$P_{el} = R_{el} \cdot 50.400 \text{ kJ/kg CH}_4 = R_{el}50.400 \text{ kW.s. } 1\text{h}/3600 \text{ s/kg CH}_4 = 14R_{el} \text{ kWh/kg CH}_4. \quad (5)$$

Onde

P_{el} = potencial de produção de energia elétrica (kW.kg⁻¹DQO.)

R_{el} = eficiência de conversão de calor de combustão em energia elétrica (≈ 35 %)

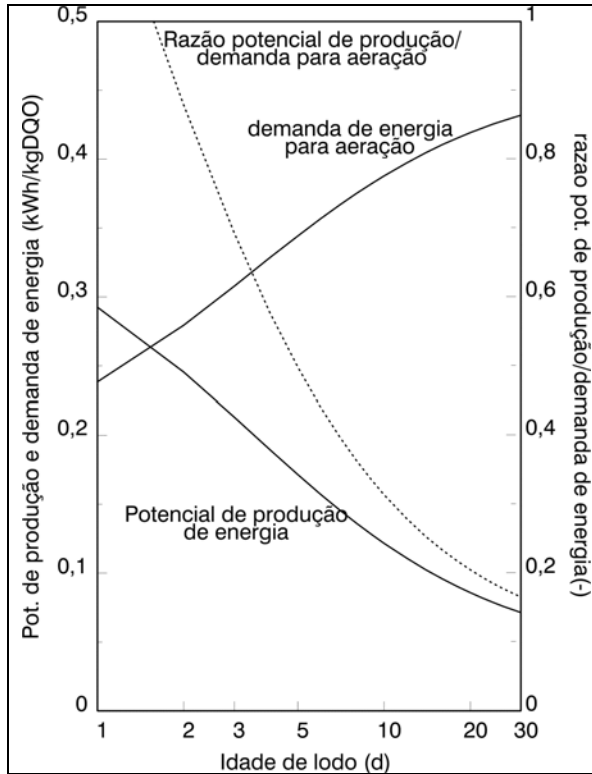


Fig 3: Potencial de produção de energia a partir de metano e demanda para aeração em função da idade de lodo

Como se necessita 4 kg de DQO ou $4/f_{cv} = 2,67$ kg SVS para a geração de 1 kg de metano, pode-se calcular a energia a partir de lodo digerido como:

$$mE_{el} = R_{el} * 14 / 2,67 * mE_d = R_{el} * 5,25 * mE_d \quad (6)$$

onde:

mE_{el} = potencial de produção de energia elétrica por kg DQO afluente aplicada.

mE_d = massa de lodo digerido por kg DQO aplicada

Por outro lado a teoria de lodo ativado permite calcular a demanda de oxigênio para a respiração exógena e a respiração endógena:

$$mS_o = mS_{o,ex} + mS_{o,em} \quad (7)$$

onde

$$mS_{o,ex} = (1 - f_{us} - f_{up})(1 - f_{cv}Y)$$

$$mS_{o,em} = (1 - f_{us} - f_{up})f_{cv}(1 - f)b_h Y R_s / (1 + b_h R_s).$$

mS_o = demanda de oxigênio por unidade de DQO

$mS_{o,ex}$ = demanda para respiração exógena

$mS_{o,em}$ = demanda para respiração endógena.

Na Figura 3 se observa tanto o potencial de produção de energia a partir do metano da digestão anaeróbia do lodo como a demanda de energia para aeração (oxidação do material orgânico). Para fazer os cálculos supôs-se que $f_{us} = f_{up} = 0,1$, temperatura = 25°C e eficiência de transferência de oxigênio = 1,5 kgO/kWh. Pode-se notar que a produção de energia é uma fração bastante significativa da demanda de energia pelo sistema de tratamento. Para uma idade de lodo muito curta teoricamente existe inclusive a possibilidade de se operar o sistema sem depender de energia externa como indica a curva interrompida que denota a razão entre o potencial de produção e a demanda de energia para aeração. Todavia para idades de lodo mais usuais (5 a 10 dias), a energia gerada a partir do biogás pode atender a uns 30 a 40 % da demanda para aeração (sem nitrificação).

Geração de energia a partir do lodo sólido.

Depois de estabilizado, o lodo volátil em princípio é um recurso que contém energia química e esta energia pode ser convertida em energia útil. Nos vários processos que podem ser aplicados para tal, a temperatura precisa ser elevada acima de 100 °C e portanto é necessário que haja uma remoção completa da água do lodo. Sistemas de tratamento de esgoto (aeróbio ou anaeróbio) geralmente produzem lodo estabilizado com um teor de sólidos de 2 a 5 %. Existem três tipos de processos que podem ser aplicados para aumentar o teor de sólidos de lodo como mostra a Tabela 1: (1) processos que usam a gravidade, (2) processos que usam força mecânica para separar os sólidos do líquido e (3) processos térmicos para evaporação da água. Pode se notar na Tabela que a energia necessária para aplicar os processos varia muito de acordo com a natureza destes. Por outro lado, só é possível obter remoção essencialmente completa com processos térmicos: processos mecânicos têm umidade residual alta (70 a 80 %) e processos gravitacionais maior ainda (> 90%). Para usar processos térmicos é preciso que se obtenha a energia necessária.

Uma vez obtido o lodo seco é possível aplicar vários processos para transformar a energia química do lodo em energia útil. Na Fig. 4 observam-se três exemplos: (1) combustão direta, (2) pirólise e (2) gaseificação. Na combustão direta usa-se oxigênio do ar para oxidar o material orgânico do lodo e o calor é absorvido por água numa caldeira. O vapor que assim se forma é usado numa turbina para acionar um gerador que produz energia elétrica. O uso combustível sólido tem uma eficiência baixa; mesmo usando equipamento moderno, a eficiência geralmente não passa dos 10 %. Na pirólise o lodo seco é aquecido a uma temperatura de 400 a 800 °C resultando na decomposição do material orgânico e a produção de combustível sólido (carvão), líquido (óleo) e (gás de síntese) em proporções que dependem das condições do processo. A temperatura elevada é mantida pela oxidação de parte do lodo. O gás pode ser usado para uma variedade de sínteses químicas ou então pode ser alimentado diretamente a um motor de ciclo Otto para acionar um gerador e produzir energia elétrica. A combustão direta do combustível num motor de explosão leva a uma eficiência muito maior, na ordem de 35 %. Todavia uma parte do lodo se perde porque deve ser queimada para manter o reator na temperatura necessária. As mesmas opções dos produtos gasosos também existem para o óleo, sendo que neste caso geralmente convém mais usar o óleo como combustível automotivo. Na gaseificação a temperatura utilizada é mais elevada (> 800 °C) e o material volátil do lodo é quase completamente transformado em produtos gasosos que podem ser usados para geração de energia elétrica. Neste caso também pode ser interessante procurar produzir alguns dos muitos produtos que se pode gerar a partir do gás de síntese.

A energia útil que pode ser obtida nos diferentes processos térmicos pode ser estimada da seguinte maneira: Na oxidação de lodo volátil (ou qualquer material orgânico) com oxigênio libera-se uma quantidade de energia de 13,8 kJ/gDQO ou 20.800 kJ/kgSVS ($f_{cv} = 1,5$ kgDQO/kgSVS). O valor necessário para secar completamente o lodo depende da umidade e do calor de evaporação: 2600 kJ/kgH₂O Deste modo pode-se expressar a energia liberada na combustão de lodo como

$$E_d = Q_{co}(1-U)f_v - Q_{ev}U \quad (8)$$

Tabela 1: Natureza de processos de separação das fases sólida e líquida de lodo, a energia necessária e o teor de sólidos que pode ser obtido.

Processo de secagem	Demanda de energia (kWh/m ³ de água separada)	Teor de sólidos final (%)	
		entrada	Saída (Limite máximo)
<i>Processos de gravidade</i>	10 ⁻³ a 10 ⁻²		
Adensamento		2-3	3-5
Flotação		2-4	4-6
<i>Processos mecânicos</i>	10 ⁰ a 10 ¹		
Centrifugação		5	20
Filtro de esteira		5	20
Filtro prensa		5	25-30
<i>Processos térmicos</i>	10 ³		
Leitos de secagem		2-4	50-90
Secadores rotativos		25-40	>90
Dispersão no ar (Flash dryer)		50-60	>90
Secador de múltiplas bandejas		60	>90
Pirólise		80	>99
Gaseificação		80	>99

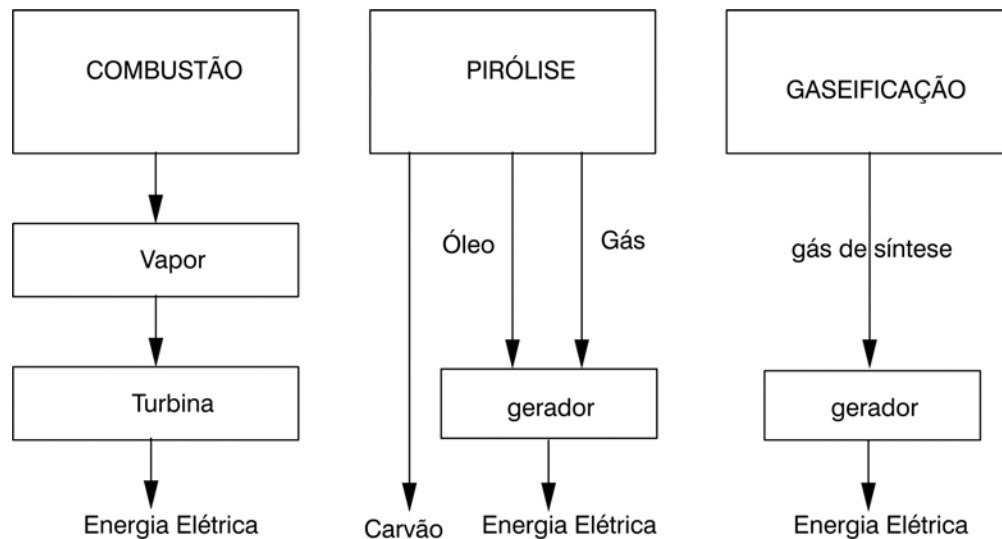


Fig. 4: Processos térmicos disponíveis para obter produtos e energia elétrica a partir de lodo de sistemas de tratamento.

Onde

E_d = energia liberada na combustão de 1 kg de lodo úmido com umidade U

U = umidade de lodo quando entra no sistema de combustão = fração de água no lodo molhado

f_v = fração de voláteis nos sólidos de lodo

Q_{co} = calor de combustão de lodo volátil (= 20.800 kJ/kgSVS)

Q_{ev} = valor de evaporação de água (2600 kJ/l_{H2O})

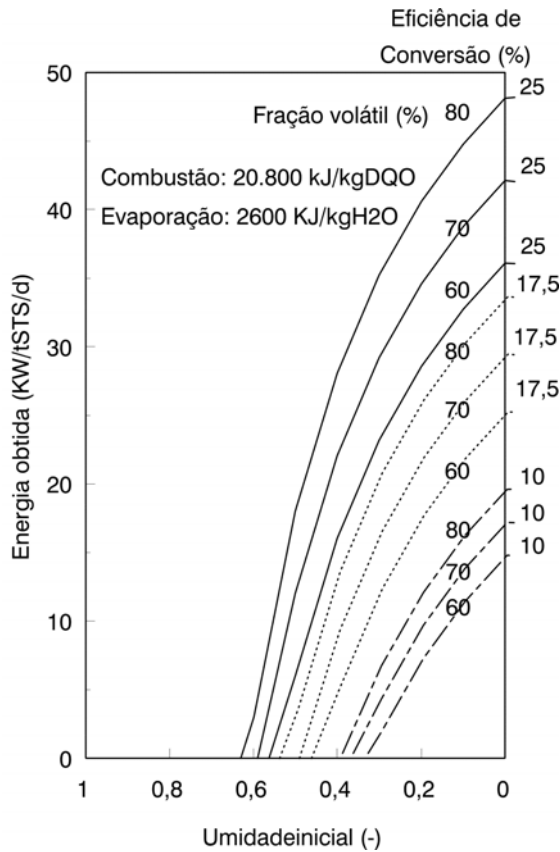


Fig 5: Energia por unidade de massa de sólidos na oxidação de lodo em função da umidade inicial para diferentes valores da fração volátil de eficiência de conversão energética

No caso de haver excedente ($E_d > 0$), nem toda a energia disponível será efetivamente ser transformada em energia aproveitável. Se a eficiência de geração de energia elétrica for f_{ef} a energia gerada por unidade de massa de lodo úmido será:

$$E_u = f_{ef} E_d \quad (9)$$

A energia útil por unidade de massa de lodo seco (STS) pode agora ser expressa como:

$$E_s = E_{el} / (1-U) = f_{ef} E_d / (1-U) \quad (10)$$

Onde

E_s = Energia útil por unidade de massa de lodo seco (STS)

E_u = Energia útil por unidade de massa de lodo úmido

E_d = Energia liberada por unidade de massa de lodo úmido

f_{ef} = fração da energia liberada que é aproveitada para produzir energia útil

U = Umidade de lodo ao entrar na unidade de geração de energia

Na Figura 5 se plotou a energia útil que se pode obter por t/d de lodo produzido em função da umidade para valores da fração volátil de 60, 70 e 80 % dos sólidos totais e para diferentes valores da eficiência de conversão de energia (10, 17,5 e 25 %). Lodo de sistemas de tratamento de esgoto normalmente está nesta faixa. Pode se observar que a energia pode ser negativa quando o teor de sólidos é baixo (umidade elevada), ou seja, o valor de combustão não é suficiente para evaporar a água do lodo úmido. Naturalmente nestas condições não há possibilidade de se gerar energia útil,

uma vez que não há um excedente aproveitável. A Figura 5 mostra que a geração de energia útil depende muito dos seguintes fatores: (1) a umidade inicial (2) a fração de lodo volátil no lodo e (3) a eficiência de conversão energética. Quanto à umidade inicial é fundamental que esta seja baixa, senão a energia necessária para evaporação é maior que a energia liberada na oxidação do material orgânico do lodo. Por outro lado quanto maior a fração de lodo volátil maior será a energia obtida, uma vez que se considera que somente esta fração gera energia.

Normalmente no caso de tratamento de esgoto a fração volátil de lodo em sistemas de tratamento aeróbio está na faixa de 70 a 80 % dos sólidos totais. No caso de sistemas de tratamento anaeróbio (onde a produção de lodo volátil é menor), a fração geralmente está na faixa de 60 a 70 %. A Figura 5 mostra que o fator de maior importância na obtenção de energia útil a partir de lodo é a eficiência de conversão energética. Se a combustão direta de lodo for aplicada, a eficiência energética dificilmente ultrapassa 10 %, mas no caso da aplicação de pirólise podem se obter valores mais altos, possivelmente na faixa de 20 a 25 %.

É interessante observar que a baixa eficiência de conversão energética implica que na oxidação há uma perda considerável de energia na forma de calor, que, ao menos em princípio, pode ser utilizado na secagem térmica do lodo antes que este entre no sistema de geração de energia por uma das três vias indicadas acima. Este princípio de co-geração (uso de energia elétrica e calor) faz com que o rendimento térmico do processo aumente.

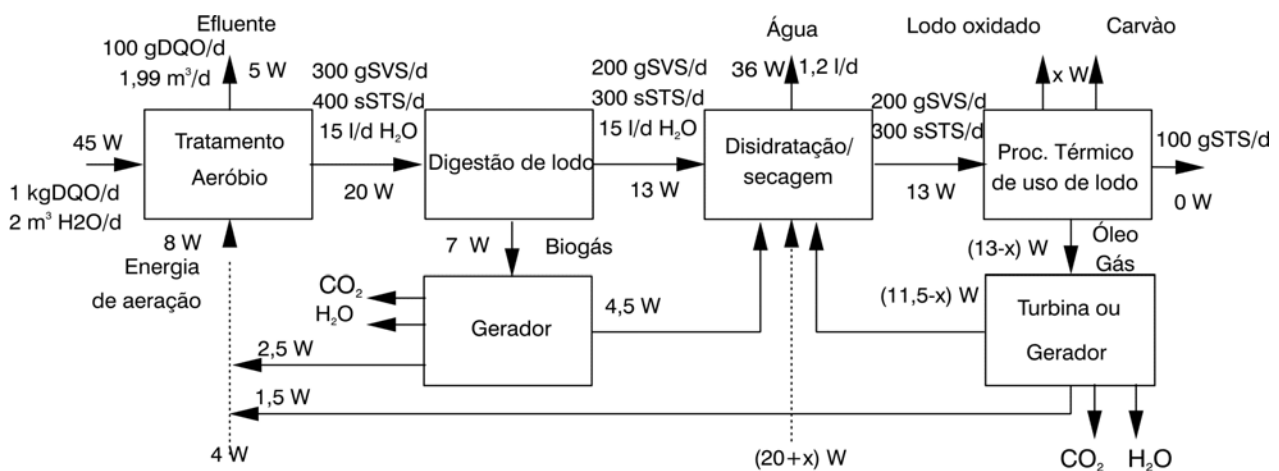


Fig. 6: Estimativa dos fluxos de materiais e de energia em um sistema de tratamento aeróbio com digestão anaeróbia de lodo, seguido por secagem e tratamento térmico.

Tabela 2: Critérios de cálculos para estabelecer os fluxos e composição de lodo e a energia associada quando 1 kgDQO/d de esgoto é submetido a tratamento aeróbio.

Estágio	Critério	Material (g/d)	Energia (W)
<i>Tratamento aeróbio</i>	Idade de lodo = 3 d (fig. 2)		
DQO no afluente	100 % (- 1 kg/d)	1000 g/D	45 W
DQO no efluente	10 % =	100 g/d	5 W
DQO oxidado	45 % =	450 g/d	20 W
DQO no lodo	45 %	450 g/d	20 W
Produção de lodo (SVS)	$f_{cv} = 1,5 \text{ gDQO/gSVS}$	300 g/d	20 W
Produção de lodo (STS)	$f_v = 0,75 \text{ GSVS/gSTS}$	400 g/d	
Volume de lodo	Concentração = 33 gSTS/l	15 l	
Demanda p/aeração			8 W
<i>Digestão</i>			
Lodo volátil convertido em CH ₄	1/3	100 g/d	7 W
Lodo volátil estabilizado	2/3	200 g/d	13 W
Lodo estabilizado	STS + SFS	300	
<i>Gerador</i>			
Eficiência de conversão	35 %		2,5 W
Transformado em calor	65 %		4,5W
<i>Desidratação Secagem</i>			
Fração de sólidos na torta	U = 20 %	300 g/d	
Volume de água na torta	= 370/U -370	1,2 l/d	
Energia para evaporação			36 W
<i>Processos térmicos de uso lodo</i>			
Combustão total	13 W disponível		
Resíduo	SFS	100 gSFS/d	
<i>Gerador</i>			
Eficiência de geração	10-15 %		1,5 W
Calor residual	85-90 %		11,5 W

Calor de combustão de lodo: 20.800 kJ/gSVS; calor de evaporação de água: 2600 kJ/l_{H2O}.

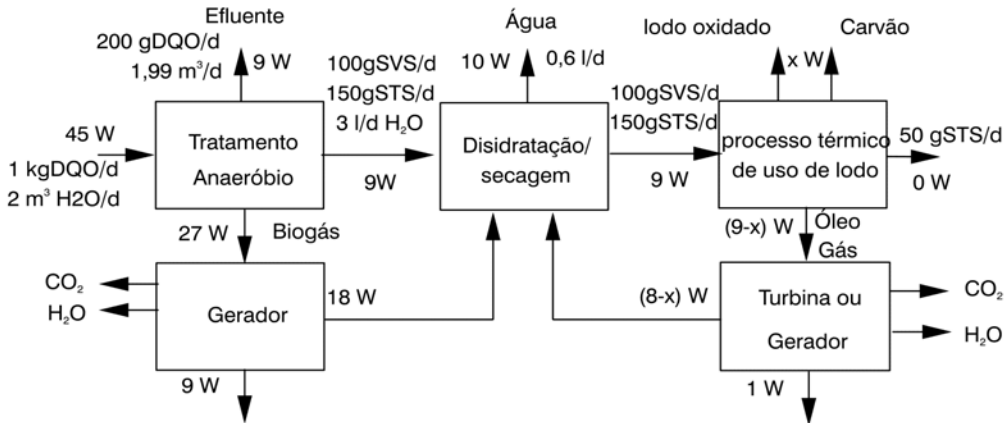


Fig. 7: Estimativa dos fluxos de materiais e de energia em um sistema de tratamento anaeróbio com secagem de lodo, seguido tratamento térmico.

Tabela 3: Critérios de cálculos para estabelecer os fluxos e composição de lodo e a energia associada quando 1 kgDQO/d de esgoto é submetido a tratamento anaeróbio.

Estágio	Critério	Material (g/d)	Energia (W)
<i>Tratamento aeróbio</i>			
DQO no afluente	Idade de lodo = 50 d (Fig. 2)		
DQO no efluente	100 % (- 1 kg/d)	1000 g/D	45 W
DQO digerido	10 % =	200 g/d	9 W
DQO no lodo	65 % =	650 g/d	27 W
Produção de lodo (SVS)	25 %	150 g/d	9 W
Produção de lodo (STS)	$f_{cv} = 1,5 \text{ gDQO/gSVS}$	100 g/d	
Volume de lodo	$f_v = 0,67 \text{ gSVS/gSTS}$	150 g/d	
	Concentração = 50 gSTS/l	3 l	
<i>Gerador</i>			
Eficiência de geração	35 %		9 W
Calor residual	65 %		18 W
<i>Desidratação Secagem</i>			
Fração de sólidos na torta	$U = 20 \%$	150 g/d	
Volume de água na torta	$= 370/U - 370$	0,6 l/d	
Energia para evaporação			18 W
<i>Processos térmicos de uso lodo</i>			
Combustão total	9 W disponível		
Resíduo	SFS	50 gSFS/d	
<i>Gerador</i>			
Eficiência de geração	10 %		0,9 W
Calor de combustão	90 %		8,1 W

Calor de combustão de lodo: 20.800 kJ/gSVS; calor de evaporação de água: 2600 kJ/l_{H2O}

Para poder estimar a quantidade de energia que se pode gerar a partir de lodo é necessário que se faça uma série de suposições. Na Tabela 2 estas suposições são feitas para um sistema de tratamento aeróbio de alta taxa (idade de lodo curta de 5 a 10 d) e para um fluxo de 1 kgDQO/d sendo tratado. A Fig. 6 apresenta graficamente os fluxos de material e de energia. Para efeito de cálculo da demanda de energia na aeração e na secagem admitiu-se que a eficiência de transferência de oxigênio é 1,5 kgO/kWh e que na desidratação há remoção de água até uma umidade de 20 %, sendo que o resto da água tem de evaporar pela aplicação de calor. Semelhantemente tem-se na Tabela 3 os critérios para estimar o fluxo de energia no tratamento de 1 kg de DQO/d em um sistema de tratamento anaeróbio (idade de lodo = 50 d). Neste caso na há estabilização de lodo (o lodo de excesso já sai estabilizado do sistema de tratamento). A Fig. 7 mostra o fluxograma correspondente.

Quando se analise o sistema de tratamento aeróbio tornam-se claros os seguintes aspectos:

- (1) É impossível operar um sistema de tratamento aeróbio sem energia externa: (1) a demanda de energia elétrica excede o potencial de geração pelo uso do biogás obtido na estabilização de lodo e de processos térmicos de utilização do lodo e (2) a demanda de energia para evaporação de água na secagem térmica de lodo calor excede o potencial de produção de calor a partir dos mesmos processos. A aplicação de calor externa é pré-requisito para viabilizar aplicação de processos térmicos de utilização de energia.
- (2) enquanto a aplicação de processos térmicos de utilização do potencial energético de lodo pode ser expressiva em termos de redução da massa de lodo (redução de 70 a 80 %), o potencial de geração é modesto e não constitui um fator importante na matriz dos custos operacionais de sistemas de tratamento aeróbio.
- (3) Sistemas de tratamento anaeróbio têm o potencial de operar em condições de auto-suficiência em termos de energia, porque uma maior fração da DQO do afluente é transformada em metano e menos lodo é produzido, diminuindo a demanda para secagem deste lodo antes do uso em processo térmico.

Conclusões

- (1) Enquanto sistemas de tratamento anaeróbio podem ser operados em consumo de energia externa, a auto-suficiência energética de sistemas aeróbios de tratamento é impossível pela própria estequiometria dos processos biológicos e químicos.
- (2) Aplicação da digestão anaeróbia para tratamento do afluente em sistemas anaeróbios ou para estabilização de lodo em sistemas aeróbios tem um potencial de geração de energia útil muito mais expressivo do que o dos processos de térmicos de lodo e seu custo de investimento e operação é bem menor
- (3) Secagem eficiente é uma operação necessária antes da utilização de lodo em processos térmicos. O calor que pode ser gerado pelo uso de biogás e utilização térmica de lodo é insuficiente

para a demanda para evaporação da água de torta de lodo em sistemas aeróbios, havendo, pois necessidade de usa de energia externa, por exemplo, energia solar.

(4) Processos de tratamento térmico de lodo têm um grande potencial de redução de massa de lodo (70 a 80 %), mas o potencial de produção de energia elétrica é pouco significativo.

Referencias bibliográficas

Henze M e Haremoës P. (1983) Anaerobic treatment of Waste Water infixed film reactors - A literature review Water Science and Technology 15, 1

Henze M. Grady C.P.L. Gujer W. Marais G.v.R. e Matsuo T (1986); "Activated sludge model N° 1" Scientific and Technical reports N° 1, IAWPRC, London, Reino Unido

Marais, G.v.R. e Ekama, G.A. (1976). " The Activated Sludge Process: Steady State Behaviour", Water S.A., 2, (4), 163-200.

Van Haandel A.C. and Lettinga G.: Anaerobic sewage treatment in regions with a hot climate. Ed John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom (1994).

Van Haandel A. C. e Marais G.v.R.: O Comportamento do sistema de lodo ativado: Teoria e aplicações para operação e projetos Ed Epgraf Campina Grande PB (1999)

Agradecimentos

O autor agradece o apoio do governo Brasileiro mediante suas agências FINEP (PROSAB) e CNPq, que possibilitou a elaboração do presente trabalho.