

## II-152 - DIGESTÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS POR PROCESSO BIFÁSICO COM PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO

**Thiago Koblitz Bollmann**

Acadêmico de Engenharia Civil e Bolsista de Iniciação Científica da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

**Guilherme Samways** <sup>(1)</sup>

Engenheiro Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Mestre e Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Meio Ambiente (PPGERHA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

**Miguel Mansur Aisse** <sup>(1)</sup>

Professor Titular Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Meio Ambiente (PPGERHA) e do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica (EP USP).

**Endereço** <sup>(1)</sup>: Departamento de Hidráulica e Saneamento - DHS da Universidade Federal do Paraná; Bloco V - Centro Politécnico - Jardim das Américas; CEP 81.531 - 990; Curitiba - PR; Tel: (41)3361-3144 - e-mail: [miguel.dhs@ufpr.br](mailto:miguel.dhs@ufpr.br).

### RESUMO

O lodo de esgoto contém microorganismos patogênicos que refletem diretamente as condições de saúde da população contribuinte do sistema de esgotamento sanitário, destacando as bactérias, os vírus, os protozoários e os ovos de helmintos. O tratamento térmico é uma das técnicas de eliminação ou diminuição dos microrganismos patogênicos, por meio da combinação entre tempo e temperatura de exposição (RT). No sentido de tornar mais eficientes os processos envolvidos a jusante, propõe também realizar a conversão biológica do lodo termohidrolisado em reatores independentes. Desta forma, os substratos solúveis seriam rapidamente convertidos no primeiro reator (RH), enquanto o material em suspensão teria a sua digestão continuada (RM), sem riscos de acumular os produtos de hidrólise, pois estes seriam retirados (elutriados) do primeiro reator. O objetivo desta pesquisa foi estudar a estabilização do lodo de esgotos, por meio da operação de um sistema composto por uma etapa de hidrólise térmica, seguida de digestão com elutriação, em reatores tipo UASB, em duas fases, operando na faixa mesofílica de temperatura. O substrato utilizado foi o lodo proveniente de tanques sépticos. O aparato experimental foi originalmente sugerido por Noyola *et al.* (2007). O termohidrolisador (RT) operou em batelada (temperatura de 60 °C, num tempo de 60 minutos). Os reatores biológicos tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) (RH e RM), com volume 7,4 e 1,9 L, operaram na temperatura de 35 °C. Quanto à hidrólise do lodo séptico os resultados indicaram um aumento da relação alcalinidade/acidez na ordem de 72%, sugerindo uma melhora na adequação do lodo para processos anaeróbios. Houve uma ampliação de 1,5x da DQO do lodo séptico hidrolisado em função da desintegração térmica da fração orgânica do lodo anaeróbio. Também foi notado um tênue aumento da relação STV/ST. Esses dados indicam ganhos para a digestão do lodo com processos de pré-hidrólise térmica. Quanto ao tratamento em duas fases, o reator ainda não atingiu a Carga Orgânica Volumétrica (COV) que permita o tratamento em duas fases com elutriação. A eficiência na remoção de DQO foi da ordem de 57% para a carga de 2 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> e 43% para a carga de 4 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biossólidos, lodo de tanque séptico, reator UASB, tratamento anaeróbio bifásico, tratamento térmico de lodos.

### INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto contém microorganismos patogênicos que refletem diretamente as condições de saúde da população contribuinte do sistema de esgotamento sanitário, dentre eles destacam-se as bactérias, os vírus, os protozoários e helmintos. O mesmo pode ser dito para o lodo proveniente de tanques sépticos, essa última alternativa de saneamento para áreas urbanas periféricas ou de baixa densidade, e rurais.

A higienização do lodo séptico tem como principal objetivo reduzir ou eliminar os microrganismos patogênicos, contribuindo para o seu manuseio e disposição final. Visando definir as exigências relativas ao

uso agrícola de lodo de estações de tratamento de esgoto, foi publicada a Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006). Essa Resolução estabelece critérios, procedimentos e limitações para o uso agrícola de lodo gerado em estações de tratamento de esgoto sanitário. No Paraná, uma prática adotada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) para a higienização do lodo de esgoto tem sido realizada por meio de estabilização alcalina, com a utilização de cal seguido de um período de estocagem e maturação em pH elevado, o que inviabiliza os patógenos mais resistentes a alterações ambientais. O produto resultante desse tratamento pode ser utilizado na agricultura.

### Tratamento Térmico para Higienização do Lodo

Como alternativa para o tratamento do lodo de esgoto, uma etapa de pré-tratamento térmico pode ser utilizada. O aquecimento provoca o rompimento das ligações químicas de substâncias poliméricas em solução e da parede celular dos microrganismos e parasitas presentes, o que possibilita maior solubilização das partículas orgânicas e melhor desempenho da digestão anaeróbia do lodo, que tem por finalidade, a remoção dos patógenos e dos ovos helmintos. Portanto, a termohidrólise é uma das técnicas de eliminação ou diminuição dos microrganismos patogênicos, por meio da combinação entre tempo e temperatura de exposição.

Barés (2010) cita que a hidrólise do lodo de esgotos facilita a estabilização, propicia a melhora na desidratação e a redução do número de patógenos. A autora, citando Noyola *et al.* e Arce (2009), afirma que o lodo que passa por processo de digestão em reatores UASB (operando a temperatura mesofílica), com pré-tratamento térmico (termohidrólise), operando a temperatura controlada, entre 60° e 70°C, por um período de 60 minutos, propicia a higienização, avaliada pela redução de ovos de helmintos. Segundo Barés, o resultado satisfatório da relação de temperatura *versus* tempo para lodo misto (primário e aeróbio), em experimentos de bancada foi 60°C, durante 60 minutos (BARES *et al.*; 2009, BARES, 2010; BARES *et al.*, 2010).

A opção de incorporar um reator termófilo, que realiza pré-digestão do lodo, aos sistemas atuais de tratamento mesofílico de lodo, pode tornar-se viável, no sentido de produzir lodo *classe A*, conforme a Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006). Entretanto, a aplicação deste processo, não substitui o processo mesofílico tradicional, apenas complementa o sistema para o tratamento do lodo.

### Hidrólise Térmica

Vários trabalhos têm sido realizados visando minimizar a problemática da gestão do lodo, produzidos em quantidades cada vez maiores, dentre eles a digestão anaeróbia precedida de pré- tratamento térmico. Bougrier *et al.* (2008) apresentam uma relação de trabalhos que utilizaram tratamento térmico, citando o tempo de exposição, o tipo de reator e o tempo de retenção hidráulico. A maior parte das pesquisas foi conduzida com temperaturas superiores a 160 °C, com exceção de Gavala *et al.* (2003), Ferrer *et al.* (2008) e Lu *et al.* (2008), que operaram na temperatura de 70°C. É possível observar, a partir destes dados, que o aumento da produção de biogás é diretamente proporcional à temperatura.

Gavala *et al.* (2003) e Skiadas *et al.* (2005), estudaram o efeito do pré-tratamento térmico a 70°C sobre a digestão posterior de lodos primário e secundário, em fase mesofílica e termofílica. Estes autores concluíram que uma etapa de hidrólise térmica é benéfica ao potencial de produção de metano, particularmente no caso de lodos primários, além de alcançar a remoção total de estreptococos fecais, quando seguido de um digestor termofílico (BRAGA *et al.*, 2009).

Bougrier *et al.* (2008), também trabalharam com esse substrato, na faixa de 90 a 210 °C. Para temperaturas de 95 °C observaram uma tênue solubilização dos sólidos, avaliada pela relação SSV/SST, mas sem comprovação estatística. Para as temperaturas abaixo de 150 °C a solubilização de carboidrato foi mais importante que a das proteínas, estas últimas localizadas principalmente dentro das células. A concentração de carboidrato decresceu com a temperatura, pois ela teria reagido, com outros carboidratos ou com a proteína solubilizada.

Borges e Chernicharo (2009) trabalharam com temperaturas inferiores as citadas por Bougrier *et al.* (2008), agora na faixa de 25 a 75 °C, num tempo de exposição acumulado de 3 a 7 h respectivamente. Porém, igualmente, avaliaram o impacto do tratamento térmico, em termos do acréscimo dos parâmetros carboidratos, proteínas, lipídios e DQO. Os resultados mostraram uma desintegração térmica da fração orgânica do lodo anaeróbio, com a disponibilidade dos parâmetros citados da ordem de 30 a 35 vezes e um aumento na produção do biogás de 50 %. O aparato experimental constou de um reator UASB recebendo esgoto sanitário, reservatório de biogás e reator térmico, com retorno de lodo ao reator UASB.

### Tratamento do Lodo em duas fases

Segundo a NBR 12.209, Carga Orgânica Volumétrica (COV), apresentada como taxa de aplicação de Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (ABNT, 2009), é utilizada para o dimensionamento do digestor anaeróbio de lodo. Assim, pode ser considerado como: Convencional não homogeneizado: taxa de aplicação de SSV igual ou inferior a  $0,5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ ; Convencional homogeneizado: taxa de aplicação entre  $0,5$  e  $1,2 \text{ kg.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ ; e Alta taxa: taxa de aplicação entre  $1,2$  e  $4,8 \text{ kg.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ .

Braga *et al.* (2009) deram início, na Universidade Federal do Paraná (UFPR), aos estudos do processo bifásico com pré-tratamento térmico. Assim, no Relatório da primeira fase das pesquisas são citados Ghosh *et al.* (1975), os quais determinaram as condições de manutenção de culturas de bactérias predominantemente acidogênicas, alimentando-as com lodos de esgoto, por meio do controle da cinética dos processos bioquímicos. Com os resultados obtidos, desenvolveram critérios para a operação de digestão de lodos em duas fases, com ênfase na fase acidogênica. A partir das pesquisas desenvolvidas neste período, surgiu o conceito de digestão anaeróbia em duas etapas, atualmente aplicado em grande escala, em algumas instalações, com resultados bastante favoráveis (Oles *et al.*, 1997). Com a finalidade de assegurar a eliminação de microorganismos patogênicos presentes nos lodos de esgoto, esses autores propuseram um processo em duas etapas, termofílica e mesofílica. De acordo com resultados de outros autores, este procedimento alia as vantagens individuais da fase termofílica, que apresenta maior capacidade de destruição de microorganismos patogênicos, com as da fase mesofílica, que apresenta maior capacidade para reduzir concentrações de ácidos graxos voláteis (AGV), com a vantagem de evitar as desvantagens de cada uma delas (Ghosh *et al.*, 1995; Han e Dague, 1997; Cheunbarn e Pagilla, 2000).

Blank e Hoffmann (2011), citando Park *et al.* (2005) e Yoshida *et al.* (2009), afirmam que a hidrólise representa a taxa determinante do processo metabólico na fermentação anaeróbia. Desacoplando a hidrólise e a acidificação da fase metanogênica, propicia-se a redução do volume do reator biológico, sob uma (ou talvez maior) atividade metabólica, avaliada pela taxa de produção de biogás, por exemplo. Esses autores desenvolveram pesquisas, em meia escala, e as cargas empregadas são muito discrepantes quando se verifica a digestão em um ou dois estágios (ver Tabela 1). Utilizaram como substrato lodo anaeróbio digerido, lodo ativado de excesso, lodo primário, restos de cozinha e outros resíduos orgânicos municipais.

**Tabela 1 – Parâmetros de projeto obtidos de pesquisas de (co-) digestão anaeróbia em um e dois estágios utilizando lodo de esgotos e diferentes substratos orgânicos**

Parâmetro	Um estágio	Dois estágios	
		Primeiro estágio (hidrólise)	Segundo estágio
TRH (d)	20	1,0	14,3
Carga ( $\text{kg SVT.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ )	1,9	36,2	2,23
Carga ( $\text{kg DQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ )	3,5	68,6	4,83

Fonte: Blank e Hoffmann (2011)

A Tabela 2 apresenta a síntese dos resultados da pesquisa de Blank e Hoffmann (2011), citando ainda os trabalhos de Perot e Amar (1989) para auxiliar na discussão, sendo omitidos os resultados das pesquisas de Martinez-Gonzalez *et al.* (2010) e Kuglarz e Mrowiec (2009), não detalhadas.

Nos estudos preliminares em escala piloto (em litros), os reatores foram aquecidos ( $36^\circ\text{C}$ ), no entanto nos estudos a meia escala (em  $\text{m}^3$ ), não ficou claro. Sabe-se que os digestores de lodo de esgotos na Alemanha são geralmente aquecidos.

Além da evidente redução do volume total requerido para os digestores, o lodo produzido apresentou características similares de desaguamento. Bougrier *et al.* (2008), afirmaram que, para temperaturas acima de  $150^\circ\text{C}$ , o desaguamento foi incrementado. Além disso, a viscosidade aparente e o Índice Volumétrico de Lodo (IVL) foram primeiramente reduzidos com a temperatura e depois permaneceram constantes para temperaturas acima de  $150^\circ\text{C}$ . Borges *et al.* (2009), encontraram que, no lodo anaeróbio de reatores tipo UASB, tratado termicamente para sua higienização, o processo de desaguamento se mostrou mais difícil. O aparato experimental constou de um reator UASB recebendo esgoto sanitário, reservatório de biogás, reator térmico e

leitões de secagem. Empregaram temperaturas de 55 e 67 °C, em tempo de exposição acumulado de 3 e 5 h respectivamente.

**Tabela 2 - Resultados de pesquisas de (co-) digestão anaeróbia em dois estágios de lodo de esgotos e diferentes substratos orgânicos**

Processo (TDH em dias)	Substrato	Biogás (L. kg <sup>-1</sup> SVT <sub>Rem</sub> <sup>-1</sup> )	Eficiência de remoção(%)		Metano (% CH <sub>4</sub> )	Fonte
			ST	AGV		
Um estágio (TDH 25)	Lodo de esgotos	987,5	40	84	69	Perot e Amar (1989)
Dois estágios (TDH 1,6 + 10)	Lodo de esgotos	755	60	83	70	
Um estágio (TDH 20)	Lodo de esgotos (54,6 %) e outros resíduos orgânicos	899,9	46,5 (*)	89	57	Blank e Hoffmann (2011)
Dois estágios (TDH 1 + 14,3)	Lodo de esgotos (54,6 %) e outros resíduos orgânicos	970,6	59,5 (*)	92	65	

OBS: (\*) Eficiência de remoção de 61 % e 60% respectivamente em termos de DQO

Uma discussão referente a concentração de Nitrogênio Total do efluente líquido (sobrenadante) dos digestores apresentou um acréscimo de cerca de 13% na proposta dos dois estágios (Blank e Hoffmann, 2011).

#### Outras alternativas de minimização do lodo

A produção de lodo em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) pode ser minimizada na fase sólida do tratamento, por intermédio das seguintes possibilidades (CASSINI, 2003): incremento da biodegradabilidade do lodo em excesso, antes da etapa de digestão; estabilização avançada do lodo de descarte por meio de processos físico-químicos; e utilização de processos de estabilização ou de higienização que não agreguem massa ou volume ao lodo. Vários mecanismos relativos à hidrólise já foram citados, podendo ainda ser lembrados a desintegração mecânica, o ultrassom, a hidrólise ácida, e a hidrólise

O trabalho de pesquisa, ora proposto, possui certa complexidade conceitual, pois: emprega, para tratamento do lodo, reatores utilizados no tratamento de esgotos (tipo UASB), em vez dos clássicos digestores de mistura completa; utiliza separação de fase, acidogênica / acetogênica e metanogênica na digestão de lodos; e emprega o conceito de Taxa de Aplicação (Carga Orgânica Volumétrica - COV), medida como SSV (kg.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>) de lodo, em reatores utilizados no entanto com esgotos, cujo parâmetro operacional é a DQO. Os seguintes objetivos específicos foram definidos: quantificar o grau de hidrólise de lodo durante o pré-tratamento térmico em batelada e determinar a produção/remoção de ácidos orgânicos voláteis a partir do acoplamento do digestor de elutriação/reator anaeróbio, ao reator de pré – tratamento.

## MATERIAIS E MÉTODOS

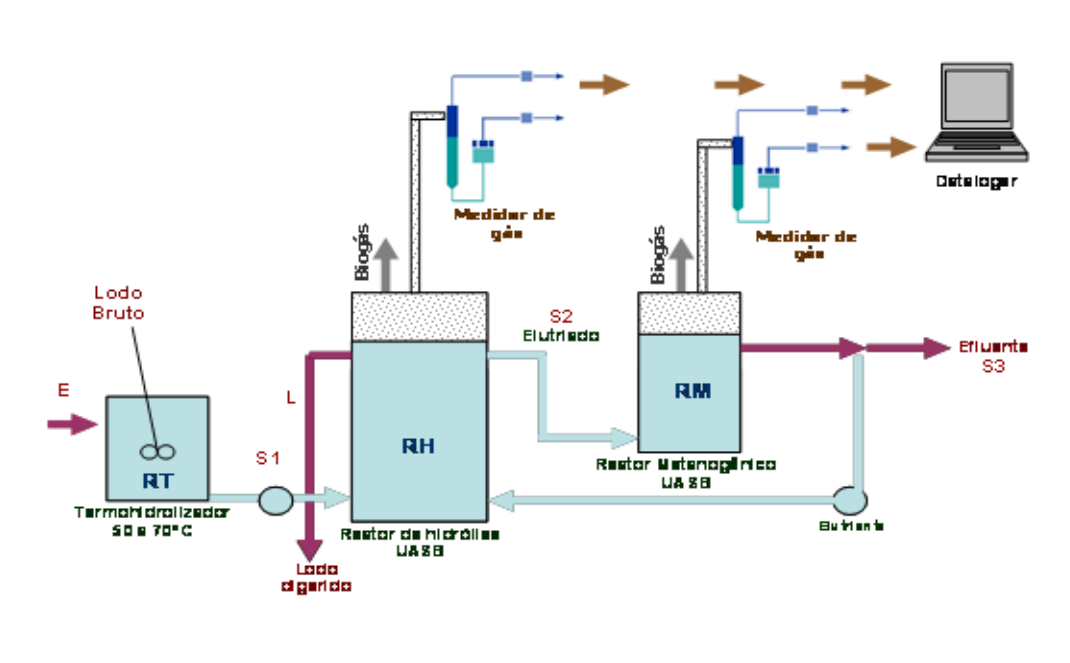
O experimento está instalado em área contígua ao Laboratório de Engenharia Ambiental Professor Francisco Borsari Netto – LABEAM, do Departamento de Hidráulica e Saneamento - DHS, da Universidade Federal do Paraná, no Campus Centro Politécnico.

### Materiais

O aparato experimental foi originalmente sugerido por Noyola *et al.* (2007), entretanto, para melhorar a operação e o funcionamento foram realizadas algumas alterações na concepção original do sistema, que teve agregados o sistema de contagem de gás e de pré-hidrólise térmica. As alterações foram utilizadas por Bares (2010).

O termohidrolisador (RT) tem a função de pré-tratamento térmico, para higienização e pré-hidrólise da matéria orgânica, seguido de um reator de hidrólise tipo UASB (RH), que tem a função de digerir o lodo, com elutriação quando acrescentado o reator metanogênico (RM). Assim, o efluente produzido pelo reator RH é

conduzido para o reator metanogênico (RM), e o efluente deste último é recirculado para o reator de hidrólise, como apresentado na Figura 1. Neste estudo, ambos os reatores são operados na faixa mesofílica de temperatura. O processo de recirculação do lodo é importante para se ter uma elevada concentração de sólidos no reator e uma idade do lodo maior que o tempo de detenção hidráulica.



**Figura 1 – Representação esquemática do sistema proposto**

Legenda: **RT** = Reator Termohidrolizador (pré-tratamento térmico - higienização e hidrólise térmica); **RH** = Reator de Hidrólise (reator/digestor -lodos tipos UASB com elutriação); **RM** = Reator Metanogênico (UASB Convencional); **E** = entrada; **L** = lodo descarte; **S1, S2, S3** = Saída.

Fonte: Barés (2010)

#### Descrição do sistema do reator termohidrolizador (RT)

O reator termohidrolizador (Figura 2a) constitui-se de uma mesa com sistema de controle térmico, por meio de um sensor posicionado em um recipiente que contém o lodo de esgoto. Este sistema opera com gradiente de temperatura de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Empregou-se na pesquisa a relação de temperatura versus tempo de  $60^\circ\text{C}$ , durante 60 minutos (BARES *et al.*, 2009; BARES, 2010; BARES *et al.*, 2010).

#### Descrição do sistema de reatores UASB

Para garantir a manutenção da temperatura específica para o desenvolvimento deste estudo ( $35^\circ\text{C}$ ), conforme o sistema experimental foi instalado em uma caixa térmica. Após o pré-tratamento térmico o lodo foi conduzido por bomba dosadora peristáltica ao reator de hidrólise RH. Em seguida, o efluente do reator RH é conduzido ao reator RM. Parte do efluente de reator RM é descartado (efluente) e parte é recirculado ao reator RH, por meio de outra bomba peristáltica. Os reatores foram confeccionados em acrílico, sendo que o reator RH possui volume útil de 7,4 L, com 60 cm de altura e 14 cm de diâmetro, enquanto o reator RM possui volume útil de 1,9 L, com 45 cm de altura e 8,1 cm de diâmetro (Figura 2b).

#### Monitoramento

Para o acompanhamento das condições operacionais dos reatores RH e RM serão analisados os parâmetros físicos e químicos conforme a Tabela 3. As análises físico-químicas, para os parâmetros de controle dos reatores, são realizadas no Laboratório de Engenharia Ambiental Prof. Francisco Borsani Netto – LABEAM. De maneira complementar foi utilizado o Laboratório do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos – CEPPA, da UFPR, ou do TECLAB.





**Figura 2 – Apresentação do sistema em operação: (a) Reator termohidrolisador (RT); (b) Reatores biológicos**

A Tabela 3 apresenta informações sobre pontos de coleta e frequência de coleta desejáveis para os parâmetros de controle. A metodologia para a análise dos parâmetros será levada a efeito de acordo com os procedimentos especificados no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998) e com as técnicas específicas desenvolvidas por ambos grupos de pesquisa (UNAM e UFPR). relação  $\alpha$  (alc. pH 5,75 / alc. pH 4,3), esta última tendo sido realizada de acordo com metodologia especificada pelo Manual de Técnicas de Laboratório, Coordenação de Bioprocessos Ambientais, Instituto de Engenharia (CBA, 1990; NOYOLA *et al.*, 2007).

**Tabela 3 – Monitoramento: parâmetros físico-químicos e ensaios**

Parâmetro	Método	Ponto de coleta	Frequência
DQO <sub>S</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	Refluxo aberto	E, S1, S2, S3	1 vez por mês
DQO <sub>T</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	Refluxo aberto	S2, S3	1 vez por semana
Conjunto de Sólidos Totais (mg.L <sup>-1</sup> )	Gravimétrico	E, S1, S2, S3, L	1 vez por semana
pH (unidades de pH)	Potenciométrico	E, S1, S2, S3, L	3 vezes por semana
Temperatura (°C)	Termométrico	E, S1, S2, S3	3 vezes por semana
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup> )	Titulométrico	E, S1, S2, S3, L	3 vezes por semana
Relação Alcalinidade ( $\alpha$ )	Equação	E, S1, S2, S3, L	3 vezes por semana
O&G; N; P (mg.L <sup>-1</sup> )	Laboratório externo	E, S1,	1 vez por mês
Atividade metanogênica específica (AME; gCH <sub>4</sub> -DQO.g <sup>-1</sup> SSV <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> )	Rocha (2011)	L, L2	1 vez por mês
Produção de biogás	Volumétrico	G	A ser viabilizado
Vazão	Volumétrico	E	3 vezes por semana

Legenda: E: entrada no sistema; L: lodo de descarte do reator de elutriação; L2: lodo do reator UASB; S1: saída do reator termohidrolisador; S2: saída do reator de hidrólise; S3: saída do reator metanogênico; G: biogás.

## Parâmetros de Operação

### Origem do lodo

O substrato utilizado atualmente é o lodo proveniente de tanques sépticos. Assim esta pesquisa se relaciona a outras, em condução na UFPR, relacionadas ao estudo de caracterização e tratamento desse lodo. O lodo séptico foi coletado por um caminhão “limpa-fossa” em um tanque séptico, instalado em uma residência unifamiliar, no Município de Colombo-PR, Região Metropolitana de Curitiba. O lodo foi transportado e acondicionado em um tanque de 7 m<sup>3</sup> localizado na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) Padilha Sul (Curitiba-PR). O lodo é transportado ao local da realização dos experimentos, de acordo com a necessidade, em galões de 20 litros e estocado em local adequado, ao abrigo da luz e calor. As amostras para análise foram armazenadas em geladeira para a preservação.

A tipologia do lodo séptico varia de acordo com as atividades humanas, dimensionamento do tanque séptico e do intervalo de remoção do lodo. Ingunza *et al.* (2009) realizaram um levantamento das características físico-químicas do lodo séptico em quatro regiões do Brasil, incluindo análises de DBO, DQO, ST, STV. Nesse estudo foram constatadas variações significativas em cada lodo caracterizado. A relação STV/DQO encontrada no estudo foi de 0,70 em média e 0,88 se analisado pela mediana, indicando uma correlação significativa entre esses dois parâmetros. Os dados, expressos na Tabela 4, indicam valores médios e medianos da caracterização em quatro regiões avaliadas assim como a variabilidade dos dados em relação a média.

**Tabela 4- Características físico-químicas do lodo séptico**

Estado		DBO (mg L <sup>-1</sup> )	DQO (mg L <sup>-1</sup> )	STV (mg L <sup>-1</sup> )	ST (mg L <sup>-1</sup> )	DBO/DQO	STV/ST
<b>FAE/SANEPAR</b>							
<b>PR</b>	<b>Média</b>	2.734±1.747	11.219±6.768	7.891±7.311	12.116±9.064	0,24	0,65
	<b>Mediana</b>	2.396	9.300	5.612	8.208	0,27	0,68
<b>UFRN/LARHISA</b>							
<b>RN</b>	<b>Média</b>	2.176±2.859	4.205±4.303	4.368±4.925	6.508±7.266	0,52	0,67
	<b>Mediana</b>	955	3.434	2.456	3.489	0,28	0,70
<b>UNB/CAESB</b>							
<b>DF</b>	<b>Média</b>	-	51±1.911	7.368±11.497	10.214±16.274	-	0,72
	<b>Mediana</b>	-	487	1.263	1.504	-	0,84
<b>USP/EESC</b>							
<b>SP</b>	<b>Média</b>	1.524±2.148	4.491±6.489	3.053±5.465	5.216±7.803	0,34	0,58
	<b>Mediana</b>	666	1.663	790	1.712	0,40	0,46

Fonte: Modificado de Ingunza *et al.* (2009)

A cultura de microrganismos anaeróbios, utilizada como inóculo do sistema de digestão anaeróbia de lodo, foi obtida de um reator anaeróbio tipo UASB, tratando esgotos sanitários, em operação pela SANEPAR. O lodo para a inoculação foi igualmente armazenado em local ao abrigo da luz e calor, para evitar a degradação do mesmo. Foi utilizado o mesmo lodo dos experimentos realizados por Basso (Basso, 2013). Os reatores RH e RM foram inoculados com um volume de lodo anaeróbio equivalente a um terço dos seus volumes úteis, e aclimatados à temperatura ambiente por um período de repouso de 24 horas (Basso, 2013). Segundo Chernicharo (2007), a inoculação é uma etapa importante, pois prepara o reator para uma digestão adequada do lodo e deve ser feito, preferencialmente, com o reator vazio e deve ser preenchido um terço do mesmo.

### Preparo

O lodo séptico apresenta características distintas, de um lodo ativado, por exemplo, pela sua heterogeneidade. A seleção do lodo também exige a observação de uma adequada relação SVT/ST. Inicialmente, realiza-se o peneiramento do lodo séptico, devido à grande quantidade materiais grosseiros não desejáveis, que eventualmente podem causar o entupimento das mangueiras da bomba peristáltica pois, em escala de bancada, os diâmetros são necessariamente pequenos. Para tal operação, foi necessária uma peneira tipo coador com duas orelhas e malha 4,75 mm. Utilizando-se uma colher simples de aço inox, espreme-se o lodo bruto dentro da peneira contra as bordas, fazendo com que o lodo líquido caia sobre um novo recipiente, promovendo assim a retirada dos materiais grosseiros.

Em seguida, o lodo filtrado pode ser levado à etapa de “cozimento”. O equipamento constitui-se de um agitador mecânico conjunto com um aquecedor com termostato. O lodo a ser aquecido é colocado em um recipiente metálico e colocado sobre o equipamento para a execução da hidrólise. Devido a problemas com as vazões das bombas peristálticas utilizadas, foram realizadas diluições na proporção de 1 litro de lodo para *n*

litros de água destilada e deionizada, onde  $n$  depende da vazão da bomba peristáltica, medida semanalmente. Após este processo, o lodo hidrolisado está apto para alimentar o sistema.

### Alimentação

A alimentação foi realizada de acordo com a quantidade de sólidos suspensos voláteis (STV) do lodo analisado em laboratório. A relação de STV/DQO encontra-se na ordem de 0,76, dentro do que se espera para o lodo séptico encontrando em Ingunza *et al.* (2009). Tendo o volume do reator de 7,4 m<sup>3</sup> e fixando-se uma COV, calcula-se a vazão ideal de lodo a adentrar o reator. Primeiramente, utilizou-se uma taxa de aplicação de 2 kgSTV.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>. Outro parâmetro verificado é a velocidade ascensional (m.h<sup>-1</sup>), cujo valor deve ser inferior a 0,5 m.h<sup>-1</sup>, como citado por Aisse (2000) e Chernicharo (2007).

No entanto, a vazão da bomba peristáltica é limitada e a vazão calculada como ideal é pequena demais, fazendo-se necessário o uso de diluições, calculadas através de uma proporção simples entre as vazões e o volume de efluente (lodo e água com lodo). Para a continuidade da alimentação do reator, para cada taxa de aplicação, os resultados dos parâmetros analisados devem indicar, principalmente, manutenção da relação  $\alpha$ , que deve estar abaixo de 1; pH estável, na faixa de 6,2 a 7,8 e redução da concentração de matéria orgânica, como DQO solúvel e bruto. O lodo para alimentação continuamente do reator RH deverá observar as concentrações de ST e STV, em função da relação STV/ST (% V/T), que deve estar acima de 0,5 (NOYOLA *et al.*, 2007). Salienta-se que esta proporção é relativa à composição do lodo bruto.

## RESULTADOS

### Hidrólise de lodo séptico durante o pré-tratamento térmico em batelada

Apesar do lodo séptico utilizado para o processo de hidrólise ser de uma única origem, as características físico-químicas não foram homogêneas em razão da retirada do lodo do tanque. As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados da caracterização do lodo bruto e do lodo hidrolizado.

**Tabela 5 - Resultados da caracterização do lodo bruto**

		Lodo Bruto							
	pH	Alcalinidade mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Acidez mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Alc / Ac	DQO mg L <sup>-1</sup>	DBO mg L <sup>-1</sup>	ST mg L <sup>-1</sup>	STV mg L <sup>-1</sup>	STV / ST
Média	7,2-7,5	1980	433	6,3	43027	-	49831	32862	0,68
Desvio									
Padrão	-	1454	352	3,3	26017	-	20810	8906	0,09
Mínimo									
(5%)	-	553	86	4,4	25400	-	36373	26893	0,60
Percentil									
(25%)	-	1422	300	4,4	28137	-	37865	27759	0,65
Mediana									
(50%)	-	2509	566	4,4	31557	-	39729	28840	0,73
Percentil									
(75%)	-	2802	632	7,3	52183	-	56746	35955	0,73
Máximo									
(95%)	-	3036	686	9,5	68683	-	70360	41647	0,74



Tabela 6 - Resultados da caracterização do lodo hidrolizado

	Lodo Hidrolizado								
	pH	Alcalinidade mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Acidez mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Alc / Ac	DQO mg L <sup>-1</sup>	DBO mg L <sup>-1</sup>	ST mg L <sup>-1</sup>	STV mg L <sup>-1</sup>	STV / ST
Média	7,2-7,9	2363	248	11	64523	6477	49985	34272	0,71
Desvio									
Padrão	-	1242	144	4	49908	2141	32654	19859	0,07
Mínimo	-	799	78	7	13351	3585	9619	7110	0,61
Percentil									
(25%)	-	1697	205	8	37273	5460	26386	20226	0,70
Mediana									
(50%)	-	3563	382	9	47240	8600	21778	16378	0,69
Percentil									
(75%)	-	3339	341	14	89821	8238	61550	45452	0,75
Máximo					11843				
(95%)	-	3754	423	17	0	8600	95610	58915	0,77

As Figuras 3 e 4 apresentam o efeito da hidrólise térmica na relação SVT/ST e na relação Alcalinidade/Acidez do lodo de tanque séptico. Inicialmente deve ser citado que o lodo de tanque séptico utilizado tem uma concentração de sólidos elevada, quando comparado ao citado por Ingunza *et al.* (2009), para lodos coletados na RM de Curitiba.

Os resultados apresentados neste estudo indicaram um aumento na relação alcalinidade/acidez na ordem de 72% no processo da hidrólise de lodo séptico, sugerindo uma melhora na adequação do lodo para processos anaeróbios. Houve um aumento na ordem de 1,5x na ampliação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) em função da desintegração térmica da fração orgânica do lodo anaeróbio. Muito aquém do encontrado por Borges e Chernicharo (2009) que foi da ordem de 30x, porém os mesmos autores trabalharam com lodo anaeróbio com uma concentração baixa de DQO, na ordem de 200 mg L<sup>-1</sup>, 200x menor do que encontrado em lodos sépticos. Essa observação pode sugerir que há uma melhor solubilização do material orgânico em processos de hidrólise em cargas mais baixas de DQO. Também foi notado um tênue aumento da relação STV/ST, indo de acordo com o encontrado por Bougrier *et al.* (2008). Esses dados indicam a possibilidade do uso de um pré-tratamento térmico-hidrolítico com ganhos para o tratamento do lodo em digestão anaeróbia posterior.

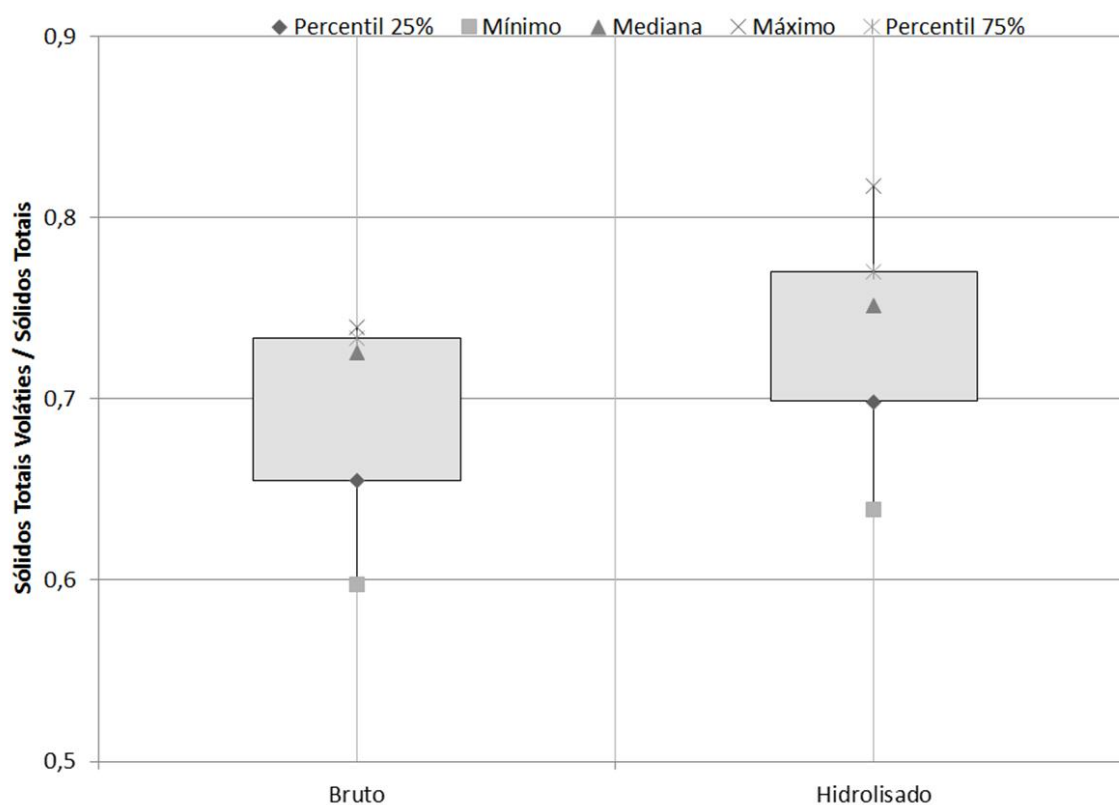


Figura 3 – Efeito da hidrólise térmica na relação SVT/ST do lodo de tanque séptico

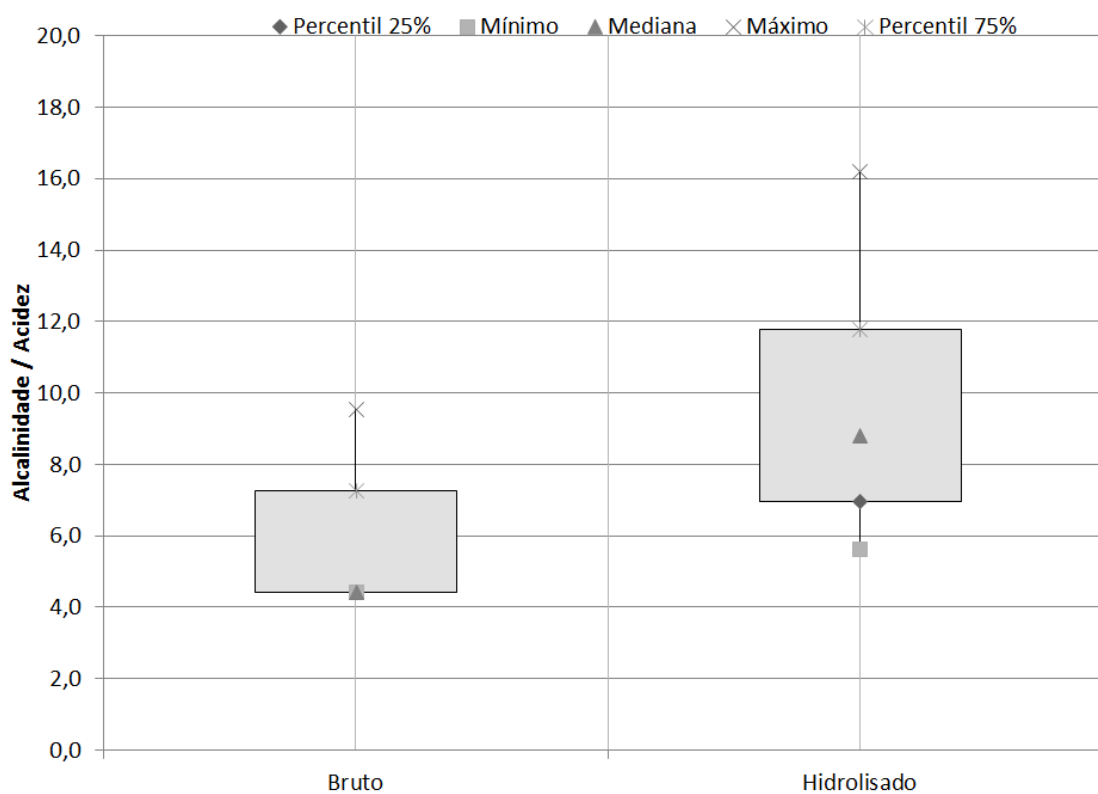


Figura 4 – Efeito da hidrólise térmica na relação Alcalinidade/Acidez do lodo de tanque séptico

**Estabilização do lodo de esgotos por meio da operação de um sistema composto por uma etapa de hidrólise térmica, seguida de digestão de lodo séptico em reatores tipo UASB, em duas fases, operando na faixa mesofílica de temperatura.**

As Tabelas 7 a 10 apresentam os resultados da caracterização do lodo bruto e do lodo efluente do reator de Hidrólise (Acidogênico / Acetogênico), para Cargas de 2 e 4 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>.

**Tabela 7 - Resultados da caracterização do lodo afluente ao Reator de Hidrólise (Acidogênico/Acetogênico) para Carga de 2 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>**

Lodo Hidrolisado Afluente COV 2 kgSTV m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>									
	pH	Alcalinidade mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Acidez mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Alc / Ac	DQO mg L <sup>-1</sup>	DBO mg L <sup>-1</sup>	ST mg L <sup>-1</sup>	STV mg L <sup>-1</sup>	STV / ST
Média	7,2-7,9	729	89	8,4	28922	4983	48365	36939	0,78
Desvio									
Padrão	-	983	110	3,4	11725	1817	27820	18883	0,04
Mínimo									
(5%)	-	179	19	5,4	16586	2779	27453	22390	0,73
Percentil									
(25%)	-	213	33	6,0	23118	4481	34975	26860	0,77
Mediana									
(50%)	-	325	40	8,1	24716	5655	42022	33173	0,78
Percentil									
(75%)	-	461	77	8,8	38099	6158	42678	33953	0,81
Máximo									
(95%)	-	2073	241	12,9	42600	6248	85797	62341	0,83

**Tabela 8 - Resultados da caracterização do lodo efluente ao Reator de Hidrólise (Acidogênico/Acetogênico) para Carga de 2 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>**

Efluente COV 2 kgSTV m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>									
	pH	Alcalinidade mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Acidez mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Alc / Ac	DQO mg L <sup>-1</sup>	DBO mg L <sup>-1</sup>	ST mg L <sup>-1</sup>	STV mg L <sup>-1</sup>	STV / ST
Média	7,2-8,0	577	50	11,8	16549	3943	11477	8093	0,71
Desvio									
Padrão	-	548	41	3,1	8719	1911	4161	2843	0,12
Mínimo									
(5%)	-	266	19	7,9	11631	2404	6539	4611	0,67
Percentil									
(25%)	-	355	25	9,5	11666	2900	8660	6452	0,60
Mediana									
(50%)	-	395	40	12,7	12500	3520	11610	7960	0,68
Percentil									
(75%)	-	441	52	13,9	17384	4775	13692	10092	0,74
Máximo									
(95%)	-	1402	115	15,5	27136	5779	16662	11490	0,88

**Tabela 9 - Resultados da caracterização do lodo afluente ao Reator de Hidrólise (Acidogênico/Acetogênico) para Carga de 4 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>**

Lodo Hidrolisado Afluente COV 4 kgSTV m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>									
	pH	Alcalinidade mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Acidez mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Alc / Ac	DQO mg L <sup>-1</sup>	DBO mg L <sup>-1</sup>	ST mg L <sup>-1</sup>	STV mg L <sup>-1</sup>	STV / ST
Média	7,2-7,9	2363	248	10,9	64523	6477	49985	34272	0,71
Desvio									
Padrão	-	1242	144	4,4	49908	2141	32654	19859	0,07
Mínimo	-	799	78	6,5	13351	3585	9619	7110	0,61
Percentil									
(25%)	-	1697	205	8,2	37273	5460	26386	20226	0,70
Mediana	-	2333	214	9,5	62571	6710	54308	37906	0,71
Percentil									
(75%)	-	3339	341	13,7	89821	8238	61550	45452	0,75
Máximo	-	3754	423	16,8	118430	8600	95610	58915	0,77
(95%)	-								

A Figura 5 apresenta o desempenho do reator de Hidrólise (Acidogênico / Acetogênico), submetido às Cargas de 2 a 4 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>. A estabilidade da relação Alcalinidade/Acidez, adequada para a digestão anaeróbia, está apresentada na Figura 6. Foi observado um aumento na relação alcalinidade/acidez durante a aplicação do lodo séptico hidrolisado no reator UASB na fase de aplicação de COV de 2 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>, e uma inalteração na aplicação da carga seguinte de 4 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>, indicando uma boa estabilidade no processo de digestão. A eficiência na remoção de DQO foi da ordem de 57% para a primeira carga e 43% na segunda carga. Esses valores indicam que o reator ainda não atingiu a maturação para o tratamento em duas fases, permitindo um aumento da COV aplicada a fim de iniciar o uso do Reator Metanogênico com processo de elutrição.

**Tabela 10 - Resultados da caracterização do lodo efluente ao Reator de Hidrólise (Acidogênico / Acetogênico) para Carga de 4 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>.**

Efluente COV 4 kgSTV m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>									
	pH	Alcalinidade mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Acidez mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Alc / Ac	DQO mg L <sup>-1</sup>	DBO mg L <sup>-1</sup>	ST mg L <sup>-1</sup>	STV mg L <sup>-1</sup>	STV / ST
Média	7,2-7,8	739	85	10,4	28340	675	16123	12447	0,78
Media	-	915	132	3,9	13840	451	7781	5688	0,02
Desvio									
Padrão	-	216	19	5,3	15100	198	11171	8827	0,76
Mínimo	-	294	27	8,3	22220	369	13372	10436	0,77
Percentil									
(25%)	-	333	39	9,1	31120	745	16123	12447	0,78
Mediana	-	701	61	13,4	35840	1051	18875	14458	0,79
Percentil									
(75%)	-	2711	254	15,4	39620	1054	21075	16067	0,79

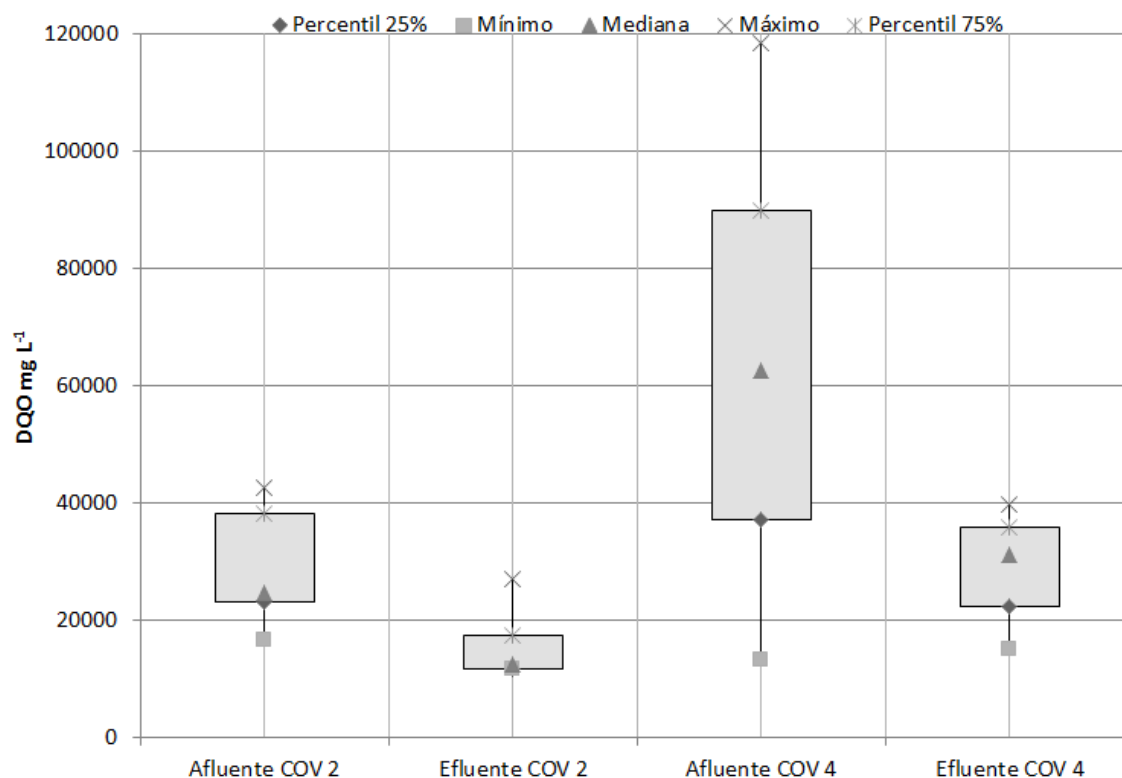


Figura 5 – Avaliação do desempenho do reator de Hidrólise (Acidogênico/Acetogênico) para Cargas de 2 e 4 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> tratando lodo de tanque séptico hidrolisado

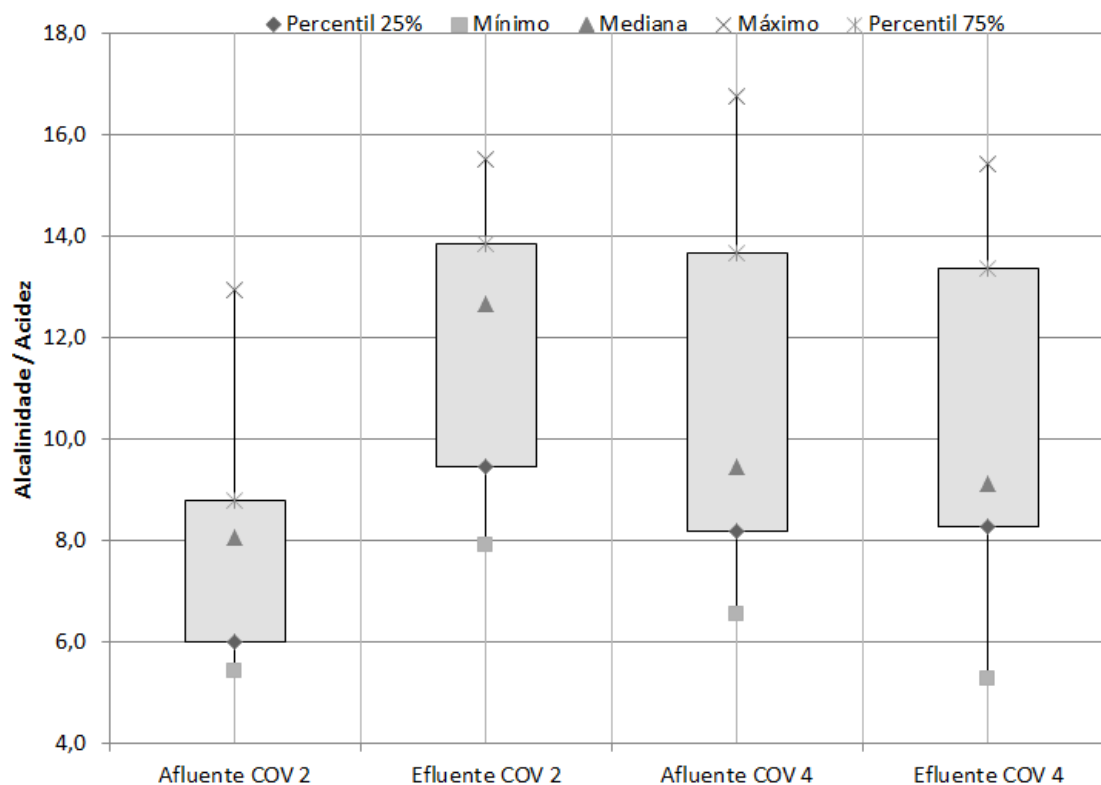


Figura 6 – Avaliação da estabilidade do desempenho do reator de Hidrólise (Acidogênico/Acetogênico) para Cargas de 2 e 4 kgSTV. m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> tratando lodo de tanque séptico hidrolisado (Relação Alcalinidade/Acidez)



## CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi estudar a estabilização do lodo de esgotos por meio da operação de um sistema composto por uma etapa de hidrólise térmica, seguida de digestão com elutriação, em reatores tipo UASB, em duas fases, operando na faixa mesofílica de temperatura, sendo obtidas as seguintes conclusões:

a) Hidrólise do Lodo Séptico - Os resultados apresentados neste estudo indicaram um aumento na relação alcalinidade/acidez na ordem de 72% no processo da hidrólise de lodo séptico, sugerindo uma melhora na adequação do lodo para processos anaeróbios. Houve um aumento na ordem de 1,5x na ampliação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) em função da desintegração térmica da fração orgânica do lodo anaeróbio. b) Tratamento em duas fases – Foi observado um aumento na relação alcalinidade/acidez durante a aplicação do lodo séptico hidrolisado no reator UASB na fase de aplicação de COV de  $2 \text{ kgSTV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , e uma inalteração na aplicação da carga seguinte de  $4 \text{ kgSTV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , indicando uma boa estabilidade no processo de digestão. A eficiência na remoção de DQO foi da ordem de 57% para a primeira carga e 43% na segunda carga. Estes valores indicam que o reator ainda não atingiu a maturação para o tratamento em duas fases, permitindo um aumento da COV aplicada a fim de iniciar o uso do Reator Metanogênico com processo de elutriação.

Para o seguimento do trabalho se recomenda: a análise da especiação do lodo, bruto e termohidrolizado, em termos de carboidratos, proteínas e lipídios, bem como dados relativos aos experimentos com cargas de  $8 \text{ kgSTV} \cdot \text{m}^{-3}$  (e maiores, se possível).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPq pelo fomento a pesquisa através do Edital Universal e pela cessão de Bolsa Iniciação Científica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma Brasileira NBR 12.209 – Elaboração de Projetos Hidráulico-Sanitários de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário, Texto 2011.
2. AISSE, M. M. **Sistemas econômicos de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, p. 191. 2000.
3. ANDREOLI, C. V.(Coord). **Lodo de Fossa e Tanque Séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.
4. APHA; AWWA; WPC – American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 th ed., 2012.
5. BARÉS, M. E.; BRAGA S. M.; AISSE M. M.; NOYOLA, A.; BRAGA M. C. B., , Determinação da melhor relação tempo versus temperatura para a eliminação de ovos de helmintos e coliformes termotolerantes em reator termohidrolisador. In: XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Recife, Brasil. **Anais**. 2009.
6. BARÉS, M. E.; BRAGA, S. M.; AISSE, M. M.; NOYOLA, A.; BRAGA, M. C. B. Avaliação da higienização térmica de lodo de estação de tratamento de esgoto In: XXXII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2010, Punta Cana, Rep. Dominicana. **Anais**. Punta Cana, Rep. Dominicana: AIDIS, 2010.
7. BARÉS, M. E. **Digestão e higienização de lodo de estação de tratamento de esgotos através de processos bifásicos com pré-tratamento térmico**. 133 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental)- Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
8. BASSO, J. **Digestão de lodo de estação de tratamento de esgoto por processo bifásico com pré-tratamento térmico: estudo de caso de lodo de tanque séptico**. Relatório de IC. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
9. BLANK, A.; HOFFMANN, E. Upgrading of a co-digestion plant by implementation of a hydrolysis stage. In: **Waste Management & Research**. 29(11): 1145-52. 2011.

10. BORGES, S. M.; GODINHO, V. M.; BEJAR, D. O. ; CHERNICHARO, C. A. L. Tratamento Térmico de lodo anaeróbio com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da auto sustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. 14(3):337-46. Jul/set 2009.
11. BORGES, S. M.; CHERNICHARO, C. A. L. Effect of thermal treatment of anaerobic sludge on bioavailability and biodegradability characteristics of the organic fraction. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. 26(3):469-80. Jul/set 2009.
12. BOUGRIER, C.; DELGENÈS, J. P.; CARRÈRE, H. Effect of thermal treatment on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. **Chemical Engineering Journal**. v. 139, p. 236-244. 2008.
13. BRAGA, M. C. *et al.* **Digestão e higienização de lodo de estação de tratamento de esgotos através de processo bifásico com pré-tratamento térmico**. Relatório Final ao CNPq. Curitiba, UFPR, 2009.
14. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n. 375, de 29 de Agosto de 2006. Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil, Brasília DF.
15. CASSINI, S. T.; CHERNICHARO, C. A. L.; ANDREOLI, C. V.; FRANÇA, M.; BORGES, E. S. M.; GONÇALVES, R. F. Hidrólise e Atividade Anaeróbia em Lodos. In: **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás**. Servio Túlio Cassini (Coord.). Rio de Janeiro, ABES. 2003. 11-52.
16. CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico das águas residuárias – Volume 5: **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. p. 380.
17. INGUNZA, M. P. D.; ANDRADE NETO, C. O. ARAÚJO, A. L. C. SOUZA, M. A. A.; MEDEIROS, S. A.; BORGES, N. B., HARTMANN, C. M., Caracterização física, química e microbiologia do lodo de fossa/tanque séptico. In: ANDREOLI, C.V (coord.). **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. Rio de Janeiro, ABES, 2009. p.375-383.
18. NOYOLA, A. R.; GARBOSSA, L. H. P.; BRAGA, M. C. B.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, C. V. S. Digestão e higienização de lodos de estação de tratamento de esgotos através de um processo de duas fases não convencionais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 24, 2007, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte, 2007.