

# Análise comparativa dos efeitos da carga orgânica e do tempo de detenção hidráulica na digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto

*Comparison of organic loading rate and hydraulic retention time effects on the mesophilic anaerobic digestion of thickened waste activated sludge*

Wanderli Leite<sup>1</sup>, Eric Maffazzoli<sup>2</sup>, Lorena Guimarães<sup>1</sup>, Anigeli Dal Mago<sup>3</sup>, Paulo Belli Filho<sup>4</sup>

## RESUMO

Esta pesquisa comparou o desempenho de um digestor anaeróbio de lodo sob diferentes estratégias operacionais. Foi avaliada a influência do aumento da carga orgânica volumétrica (COV) (OP I) e o efeito da redução do tempo de detenção hidráulica (TDH) (OP II e OP III) no processo anaeróbio. As cargas aplicadas variaram entre 0,5 e 4,5 kgSV.m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> e o TDH foi reduzido de 15 a 5 dias. Produção de gás metano, degradação do material orgânico e a diversidade microbiana foram utilizadas para medição e comparação do desempenho do processo. Foram necessários períodos de aclimação a cada nova COV aplicada o que levou às instabilidades na remoção de SV e DQO do lodo. A operação com TDH entre 7 e 5 dias apresentou as maiores eficiências de remoção de SV, superiores a 70%, o que influenciou positivamente na estabilidade do processo. As COV aplicadas de 2,5 e 3,5 kgSV.m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> resultaram nas maiores produções de metano durante a OP I. Para TDH inferiores a sete dias a produção de CH<sub>4</sub> foi prejudicada apesar da existência de microorganismos metanogênicos atuantes no digestor. Comparativamente, a estratégia de redução do TDH resultou em um melhor desempenho do sistema que a fixação da COV. Quanto menor o TDH aplicado, melhor os resultados obtidos na operação do digestor, sugerindo que a eficiência do processo é otimizada em sistemas de alta carga com operação em baixos tempos de detenção hidráulica.

**Palavras-chave:** digestão anaeróbia; lodo de esgoto; carga orgânica volumétrica; tempo de detenção hidráulica; arqueas metanogênicas, metano.

## ABSTRACT

This study compared the performance of a pilot anaerobic sludge digester under different operating strategies. The influence of increasing organic loading rate - OLR (OP I) and the effect of hydraulic retention time - HRT reduction (OP II and OP III) in anaerobic process were evaluated. The applied loads ranged between 0.5 and 4.5 kgSV.m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>; HRT was reduced from 15 to 5 days. Production of methane, organic matter degradation and microbial diversity were used to measure and compare the system's performance. Acclimation periods were taken for each new OLR applied, leading to instabilities in sludge VS and COD removals. The experimental time with HRT between 7 and 5 days showed the highest VS efficiency removals (higher than 70%), which positively influenced process stability. The applied OLR of 2.5 and 3.5 kgVS.m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> resulted in higher yields of methane during OP I. CH<sub>4</sub> production showed impaired with HRT lower than 7 days, although it was observed active methanogenic microorganisms in the digester. Comparatively, HRT reduction resulted in a better system performance than the increasing OLR approach. The lower HRT applied, the better the results obtained in the operation of the digester, suggesting that the process efficiency is optimized with high load operation at low hydraulic retention times.

**Keywords:** anaerobic digestion; waste activated sludge; organic loading rate; hydraulic retention time; methanogenic archaeans; methane.

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Florianópolis (SC), Brasil.

<sup>2</sup>Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFSC - Florianópolis (SC), Brasil.

<sup>3</sup>Engenheira Sanitarista e Ambiental na Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) - Florianópolis (SC), Brasil.

<sup>4</sup>Pós-doutorado na *Ecole Polytechnique* de Montreal - Montreal, Canadá.

**Endereço para correspondência:** Wanderli Leite - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Campus Universitário Trindade - Rua Delfino Conti - Caixa Postal 476 - 88040-970 - Florianópolis (SC), Brasil - E-mail: wanderli.leite@posgrad.ufsc.br

**Recebido:** 04/11/12 - **Aceito:** 15/10/15 - **Reg. ABES:** 105625

## INTRODUÇÃO

O principal subproduto do tratamento biológico de efluentes é o lodo secundário residual ou de descarte. A produção desse resíduo está associada ao atendimento da população por sistemas de tratamento de esgotos. Tem-se buscado, portanto, estratégias para o gerenciamento eficiente do lodo residual ainda na estação de tratamento de esgoto (ETE).

Em função da necessidade de um destino sustentável aos lodos produzidos em ETE deve-se buscar e pesquisar métodos para o seu gerenciamento. A digestão anaeróbia (DA) é um processo apropriado para o tratamento de lodos previamente à sua disposição final, sendo conhecida como a mais importante e antiga técnica de estabilização de lodo biológico secundário (METCALF & EDDY, 2003), resultando na destruição dos sólidos voláteis (SV) e produção de biogás, o que reflete em menores custos de disposição final.

Os processos convencionais de digestão anaeróbia ocorrem na faixa mesofílica de temperatura, pois a grande maioria dos microorganismos anaeróbios cresce melhor em temperaturas que variam entre 20 a 40°C (GAVALA *et al.*, 2003). Segundo Dohányos e Záborská (2001), a eficiência de destruição da matéria orgânica normalmente se situa entre 25 e 50% (em SV) em reatores operados em temperaturas mesofílicas com tempo de detenção hidráulica (TDH) entre 10 e 20 dias.

A hidrólise pode ser considerada a etapa limitante do processo anaeróbio visto à dificuldade de hidrolisar substratos com altos teores de sólidos. Em lodos previamente adensados, esta etapa é ainda mais significativa, visto que a concentração de sólidos no lodo varia de 0,5% antes do adensamento a até 4,0% após o adensamento (METCALF & EDDY, 2003), garantindo maior agregação e compactação das partículas, o que pode inviabilizar ou diminuir a biodisponibilização dos compostos orgânicos aos microorganismos anaeróbios (APPELS *et al.*, 2008).

No intuito de verificar a capacidade suporte do digestor, variações na carga orgânica volumétrica (COV) podem ser efetuadas com incrementos na concentração afluente ou com a elevação da vazão de carregamento de um lodo com concentração constante (MAHMOUD, *et al.*, 2003). Considerando-se as dificuldades de controle da concentração afluente em digestores anaeróbios de lodo, sujeitos à eficiência da sedimentação nos decantadores secundários e adensadores, um controle do TDH através de mudanças na vazão torna-se mais fácil e atrativo financeiramente e, desta forma, é possível manter o sistema em funcionamento operando com COV variável.

O tratamento de lodo biológico secundário em sistemas de digestão anaeróbia com controle da COV e do TDH tem sido amplamente discutida (BOLZONELLA *et al.*, 2005; NGES & LIU, 2010, LEE & RITTMANN, 2011; WEI *et al.*, 2011). Existe pouca informação, porém, quanto a uma investigação que teste as duas estratégias operacionais

seguidamente, adaptando-se às variações de concentração de sólidos do lodo bruto afluente e à vazão aplicada ao reator. Este artigo apresenta e compara o desempenho de um digestor anaeróbio piloto em mesofilia operado inicialmente com incrementos graduais da carga orgânica aplicada e em seguida com a redução gradativa do tempo de detenção hidráulica com vistas à adequação da operação do digestor quanto à produção de lodo em uma ETE municipal. Os resultados dos regimes operacionais testados são comparados em termos de qualidade do biogás, remoção de sólidos e matéria orgânica e população microbiana.

## METODOLOGIA

O lodo biológico secundário previamente adensado (AD) foi obtido da maior estação de tratamento de esgotos da cidade de Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, que funciona com sistema de lodos ativados de aeração prolongada com tanques de desnitrificação. A Tabela 1 mostra as principais características do lodo utilizado.

A digestão anaeróbia mesofílica do AD foi investigada usando um digestor de um estágio e alta carga com controle de temperatura e agitação com volume útil de 100 L. O AD foi armazenado em um reservatório a partir do qual era bombeado para o digestor conforme o acionamento do temporizador (Figura 1).

A cada alimentação, um volume de AD foi adicionado no digestor. Simultaneamente, e por efeito de pressão hidrostática, um volume de lodo digerido (DIG) era removido. Os volumes de lodo afluente foram determinados de acordo com a estratégia operacional adotada (Tabela 2).

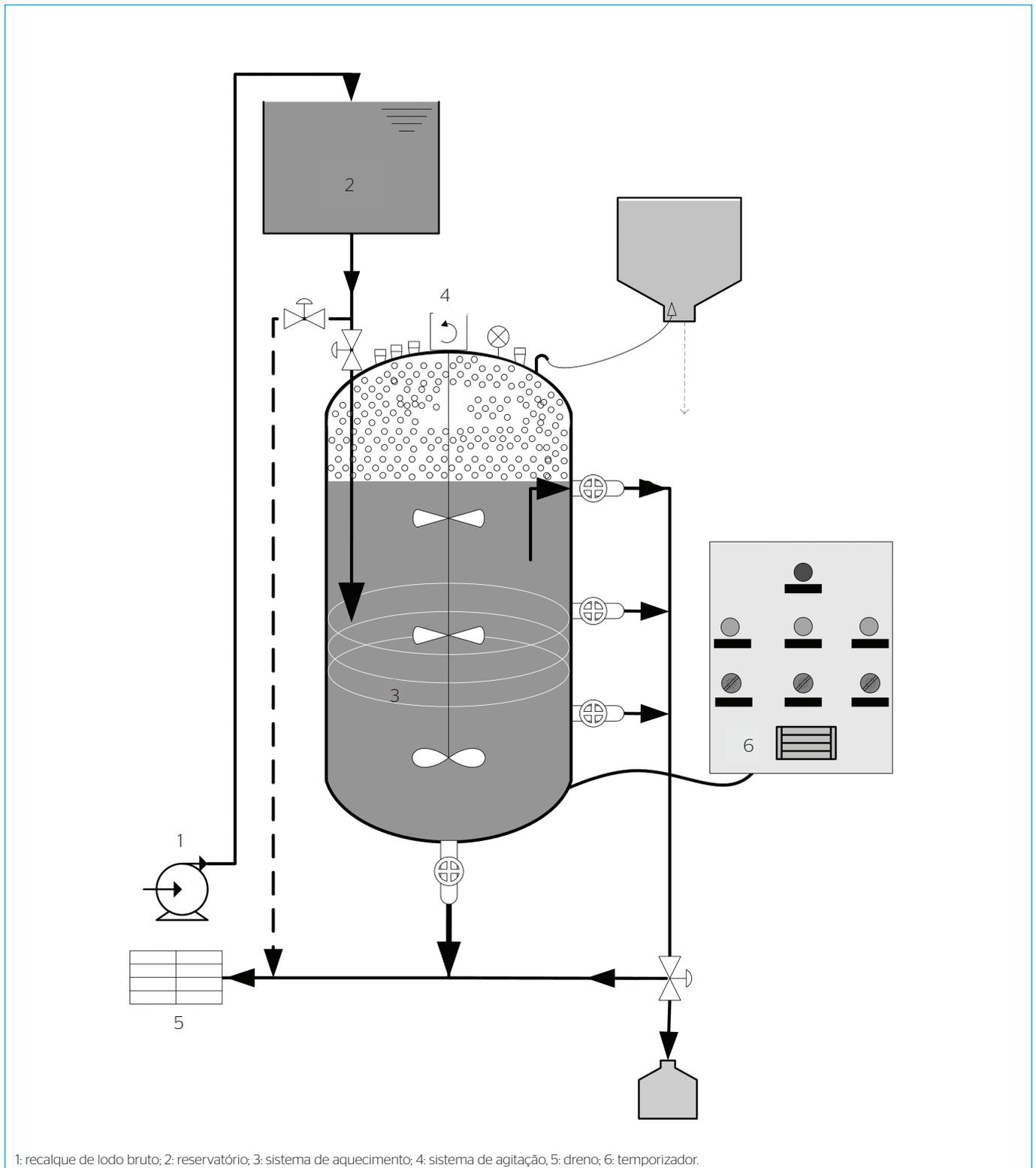
Durante o período experimental com carga orgânica volumétrica fixa (OP I) a vazão afluente foi ajustada constantemente para contemplar operações com cargas de 0,5 a 4,5 kgSV.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>. As investigações com tempo de detenção hidráulica fixo (OP II e OP III) foram realizadas considerando o AD produzido no momento. Para estas operações, o TDH variou entre 5 e 15 dias, valores típicos para digestores anaeróbios de lodo de alta carga (MALINA & POHLAND, 1992).

**Tabela 1** - Principais características do lodo secundário residual utilizado.

Parâmetro	Valor
Temperatura (°C)	20,1±0,1
Sólidos totais (g.L <sup>-1</sup> )	33,0±0,8
Sólidos voláteis (g.L <sup>-1</sup> )	23,5±0,5
Umidade (%)	97,6±0,1
DQO (g.L <sup>-1</sup> )	31,5±0,6
pH	6,6±0,2

As concentrações de metano e dióxido de carbono foram continuamente medidas usando um analisador de gás portátil (GEM 2000). A temperatura foi controlada em 35°C. A determinação das concentrações de sólidos totais (ST) e SV, demanda química de oxigênio

total (DQO) seguiram metodologias analíticas presentes no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). A produção de biogás durante a operação I foi monitorada por medidor volumétrico de gás. O potencial hidrogeniônico (pH) foi medido



**Figura 1** - Representação esquemática do digestor anaeróbio de lodo.

**Tabela 2** - Resumo das estratégias operacionais aplicadas no digestor piloto de lodo.

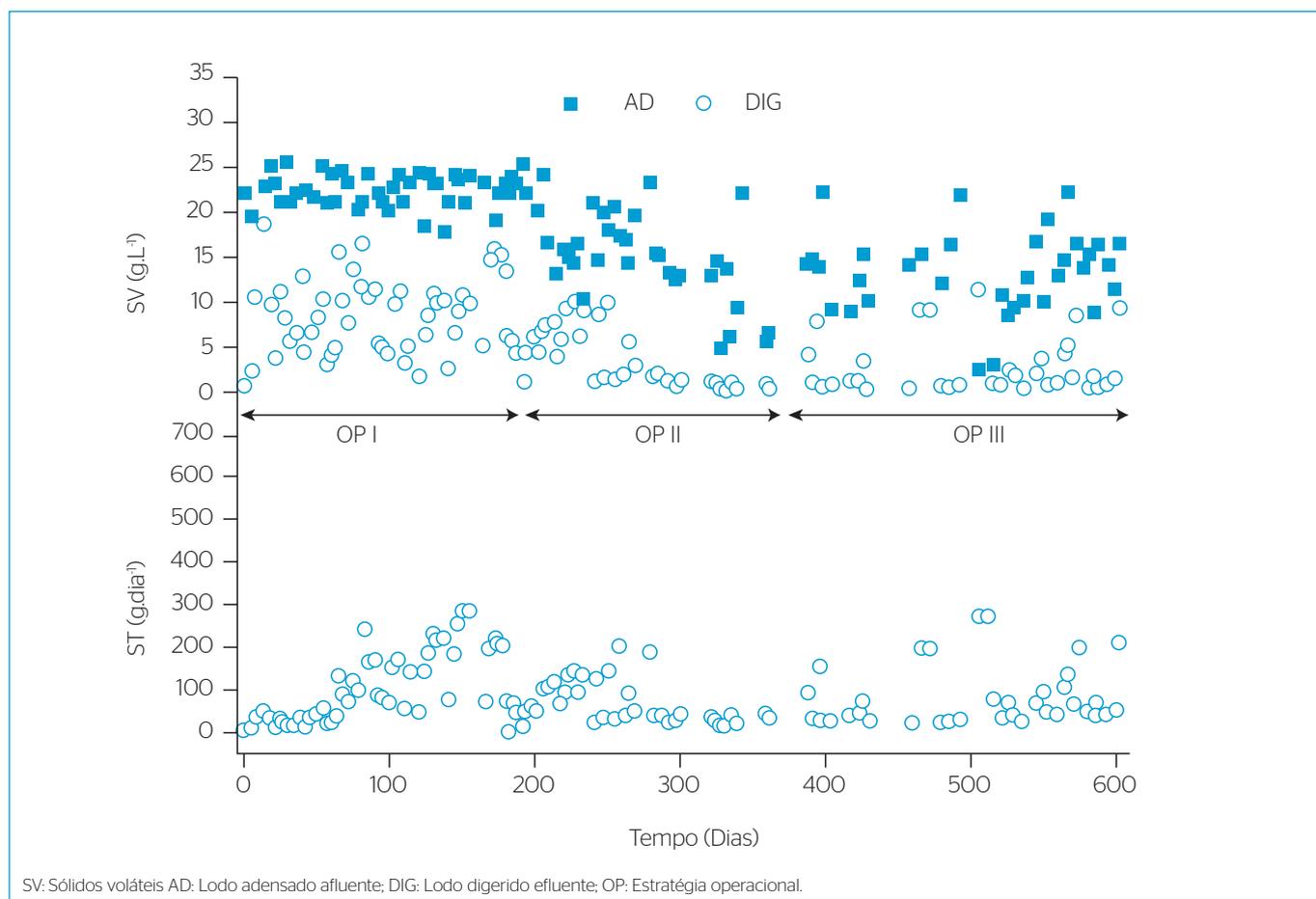
Estratégia operacional (OP)	COV	Q	TDH	Tempo operacional
	kgSV.m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup>	L.d <sup>-1</sup>	dia	dia
OP I - Incremento progressivo da COV	0,5	2,0	Variável e decrescente	42
	1,0	4,0		20
	1,5	6,0		16
	2,5	11,0		31
	3,5	15,0		28
	4,5	19,0		17
	Sem operação			
	2,0	9,0		15
	Sem operação			52
OP II - Redução gradual do TDH	Variável e crescente	7,0	15	21
		10,0	10	91
		14,0	7	39
		20,0	5	17
		14,0	7	42
OP III - TDH fixo	Variável	14,0	7	202

COV: carga orgânica volumétrica; Q: vazão afluente; TDH: tempo de detenção hidráulico.

por phmetro portátil (Hanna Sensor Check HI991003) e a alcalinidade total por titulação ácida.

Pesquisas anteriores categorizam diferentes parâmetros para a execução das mudanças na alimentação de digestores anaeróbios, entre elas a produção de gás metano, o comportamento do pH do digestor, a redução de SV e a demanda química de oxigênio (SONG; KWON; WOO, 2004; NGES & LIU, 2010; RUBIO-LOZA & NOYOLA, 2010; LEE & RITTMANN, 2011; WEI *et al.*, 2011). Nesta pesquisa, as variações na COV e no TDH ocorreram quando a eficiência de remoção de SV registrou um valor igual ou superior a 50% em pelo menos três análises consecutivas.

A avaliação de microrganismos foi realizada pela técnica de Hibridização *in situ* fluorescente (FISH) com o objetivo de confirmar a presença de arqueas, os quais são atuantes no processo de degradação de matéria orgânica com a produção de metano como subproduto no reator. Amostras de DIG foram coletadas do digestor na OPIII, fixadas com paraformaldeído 4% e hibridizadas com a sonda ARC 915, a qual possui a seqüência (5' - 3') GTGCTCCCCCGCCAATTCCT.

**Figura 2** - Dinâmica das concentrações de sólidos totais e sólidos voláteis, afluentes e efluentes.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Desempenho do digestor: produção de biogás e redução de Sólidos Voláteis

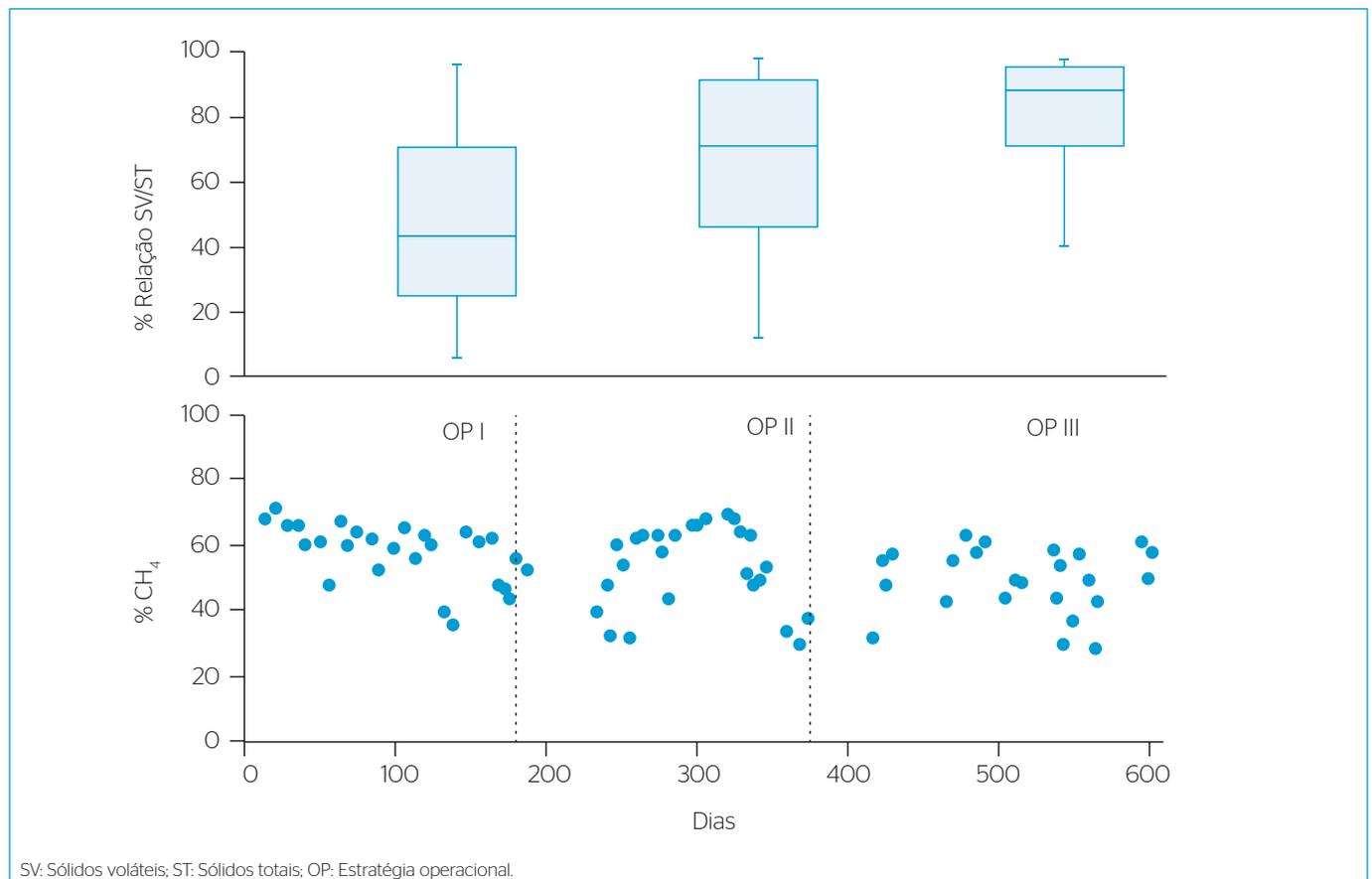
As menores concentrações de SV no lodo digerido (DIG) foram obtidas para a operação do digestor com TDH fixo (OP II e OP III), como se visualiza na Figura 2. As maiores eficiências de remoção de SV (média de 70 e 89%) ocorreram ainda para os menores TDH aplicados (sete e cinco dias, respectivamente) o que segundo Rubal, Cortacans Torre e Del Castillo González (2012) torna-se uma evidência importante especialmente para grandes ETE's nas quais a construção de um digestor de lodo com elevado TDH é inviável devido à inexistência de área disponível.

A Figura 3 mostra a eficiência de remoção de SV para as estratégias operacionais testadas assim como a qualidade do biogás ( $\text{CH}_4$ ) obtido pela fermentação anaeróbia. A operação com a fixação do TDH favoreceu as remoções de SV com valores medianos de 76,5 e 89% para OP II e OP III, respectivamente, superiores à OP I com 44,5% e a valores típicos de digestores anaeróbios de lodo que variam de 27 a 43,5% (SONG; KWON; WOO, 2004; NGES & LIU, 2010; BOLZONELLA *et al.*, 2005; GE; JENSEN; BATSTONE, 2011).

Durante a operação I (COV fixa incremento 0,5 a 4,5  $\text{kgSV}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ ) a cada incremento na COV aplicada uma quantidade maior de substrato (lodo secundário residual) era adicionada ao digestor acarretando em períodos de adaptação à nova carga levando às variações nas eficiências. Além disso, Griffin *et al.* (1998) ressaltam que a partida é geralmente considerada a etapa mais crítica da operação de digestores anaeróbios, apresentando instabilidades e importantes diferenças nas taxas hidrolíticas, acidogênicas e metanogênicas, que resultam em variações nas eficiências de remoção da matéria orgânica.

A concentração do gás metano presente no biogás foi medida ao longo de todo o experimento. Foram observadas reduções nas concentrações de  $\text{CH}_4$  nos momentos de ajuste nos parâmetros operacionais (para cada incremento na carga orgânica volumétrica ou para cada redução nos tempos de detenção hidráulica), comportamento também verificado para a remoção de SV, como mencionado anteriormente. Diversos autores (PARKIN & OWEN, 1986; SPEECE, 1996; SPINOSA & VESILIND, 2003) apontam a redução da produção de  $\text{CH}_4$  como uma evidência para o desequilíbrio do processo anaeróbio.

Ao longo da OP I, as COV aplicadas de 2,5 e 3,5  $\text{kgSV}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  resultaram na menor variação de metano com  $59,8\pm 1,6\%$  e  $54,3\pm 1,5\%$ , respectivamente. Na OP II a redução do TDH até 7 dias aumentou a



**Figura 3** - Diagrama de caixas para eficiência da remoção de sólidos voláteis e concentração de metano no biogás para o período experimental.

concentração de metano no biogás obtendo-se uma média de  $64\pm 6\%$  de  $\text{CH}_4$ . Por outro lado, ao reduzir o TDH para 5 dias, a concentração de  $\text{CH}_4$  teve média inferior ( $44\pm 12\%$ ). O retorno do TDH para 7 dias (OP III) não resultou em uma produção de  $\text{CH}_4$  igual àquela antes testada (média de  $50\pm 10\%$ ). Foram encontrados microrganismos do Domínio Arquea (Figura 4) praticamente em todas as amostras mensais deste período, o que indica uma condição ainda favorável para a ocorrência da metanogênese. O tempo de detenção hidráulica

previamente fixado considerou o aumento do metabolismo microbiano na degradação de SV a metano, o que resultou no aumento da concentração desse gás com a redução do tempo de detenção hidráulica (NAGAO *et al.*, 2012).

A digestão anaeróbia de lodos de ETE submetidos à temperatura mesofílica e ao TDH entre 10 e 20 dias resulta na redução de 30 a 40% da quantidade de sólidos voláteis do lodo bruto afluente (OROPEZA *et al.*, 2000; RUBIO-LOZA & NOYOLA, 2010; GE; JENSEN; BATSTONE, 2011).



**Figura 4** - Células hibridizadas para análise de Arqueas, OP III. (A) Arqueas positivas após 40 dias operacionais; (B) Positivas após 90 dias operacionais; (C) Positivas após 150 dias operacionais.



**Figura 5** - Conteúdo orgânico dos lodos adensado e digerido, quanto à relação sólidos totais e sólidos voláteis (SV/ST) e a demanda química de oxigênio total (DQO) para todos os períodos experimentais (OP).

Como se observa na Figura 5, a relação SV/ST, que avalia a estabilidade do lodo efluente do digestor (METCALF & EDDY, 2003), foi diferenciada para as estratégias operacionais desenvolvidas, haja vista as diferenças das eficiências de degradação da matéria orgânica, conforme visualizado na Figura 3.

O período de funcionamento com TDH fixo obteve os menores registros da relação SV/ST para o lodo digerido efluente, principalmente na OP II com 7 dias ( $0,41 \pm 0,10$ ) e com 5 dias ( $0,35 \pm 0,10$ ). Considerando que o lodo bruto adensado apresentou em média SV/ST=0,71 ao longo de todo o experimento, o valor de SV/ST obtido (>42%) em OP II foi superior ao reportado anteriormente. Este valor foi superior a 0,6 para todas as cargas orgânicas aplicadas em OP I o que mostra que a operação com TDH fixo formou um efluente mais mineralizado que aquela com COV fixa.

Foi verificado que demanda química de oxigênio apresentou comportamento semelhante à relação SV/ST, isto é, o lodo digerido efluente apresentou na OP I a maior quantidade de matéria orgânica em sua constituição e isto elevou a DQO. Eficiências de remoção de DQO para digestores anaeróbios de lodos biológicos em mesofilia situam-se em 50% (DE LA RUBIA *et al.*, 2002; BOLZONELLA *et al.*, 2005). Neste trabalho, a média de remoção para a operação do digestor com COV fixa foi inferior (45%) em relação à operação com TDH fixo (>75% para OP II e OP III).

A OP I contemplou o período de *start-up* do digestor, o que pode ter levado à maior dispersão de resultados para a remoção de SV e para a DQO. Para Najafpour *et al.* (2006), esta situação é um sinal de insuficiência na quantidade de biomassa microbiana acumulada no digestor, de modo a suportar o incremento de carga orgânica.

### Análise estatística e determinação da melhor condição operacional

Para assegurar que as médias amostrais dos resultados de DQO, ST, SV e CH<sub>4</sub> para OP I, OP II e OP III nas amostras do lodo digerido efluente compunham conjunto de dados distintos, as mesmas foram testadas frente à análise de variância multivariada e comparação múltipla de médias através do teste de Tukey (Tabela 3). Os dados utilizados foram previamente normalizados para a análise estatística (transformação Box Cox –  $\lambda$  ótimo) (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2006). A operação com carga orgânica fixa e tempo de detenção hidráulica fixo apresentaram valor de  $p < 0,05$ , indicando que estes interferiram nos resultados das variáveis escolhidas para a análise.

O teste de Tukey realizado para os dados das quatro variáveis escolhidas mostrou que o funcionamento do digestor piloto de lodo apresentou diferença significativa entre OP I, OP II e OP III, sendo que a fixação do TDH resultou em um melhor desempenho do sistema em relação à fixação da COV. Além disso, o teste indicou que quanto menor este tempo melhor os resultados obtidos, sugerindo que a eficiência do

**Tabela 3** - Análise de variância e teste de Tukey para variáveis de desempenho do digestor piloto (DQO: demanda química de oxigênio total; ST: sólidos totais; SV: sólidos voláteis; OP: estratégias operacionais testadas).

Variável	F	Grau liberdade	Valor p	Grupo Tukey ( $\alpha=0,05$ )	Média
DQO (g.L <sup>-1</sup> )	10,57	11	<0,0001	OP II - 5 dias	4,33
				OP II - 15 dias	7,08
				OP II - 10 dias	9,11
ST (g.L <sup>-1</sup> )	8,75	11	<0,0001	OP II - 5 dias	1,70
				OP III - 7 dias	5,73
				OP II - 15 dias	7,78
SV (g.L <sup>-1</sup> )	9,06	11	<0,0001	OP III - 7 dias	2,89
				OP II - 15 dias	4,66
				OP I - 1,0 kgSV.m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	7,80
CH <sub>4</sub> (%)	4,99	11	<0,0001	OP I - 1,5 kgSV.m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	63,92
				OP II - 7 dias	64,39
				OP I - 0,5 kgSV.m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	66,37

processo é otimizada em digestores de alta carga com operação em baixos tempos de detenção hidráulica (<10 dias) (APPELS *et al.*, 2008). As médias analíticas obtidas evidenciam a redução da massa de sólidos totais e voláteis (>80%) da maior composição de CH<sub>4</sub> no biogás e são condizentes com a operação de digestores mesofílicos de lodo operados com TDH inferiores a 10 dias (WANG *et al.*, 1997; MATA-ALVAREZ; MACÉ; LLABRÉS, 2000; ATHANASOULIA; MELIDIS; AIVASIDIS, 2012; CHEN *et al.*, 2012).

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo mostraram que a operação com tempo de detenção hidráulica fixo pode favorecer a redução da massa de sólidos e melhorar a qualidade do efluente em termos da concentração de ST, SV e DQO, comparado ao desempenho do digestor anaeróbio de lodo operado com carga orgânica volumétrica pré-estabelecida. Com o TDH pré-estabelecido, a operação do sistema é mais simplificada, porém está sujeita à qualidade do lodo residual afluente. No desempenho do digestor piloto com TDH fixo (OP II e OP III), com os menores TDHs (7 e 5 dias), a fração orgânica do lodo biológico residual foi degradada com eficiência acima de 80%, produzindo acima de 60% de metano na constituição do biogás. Com o aumento da COV, o desempenho do digestor foi satisfatório, sendo que as menores cargas aplicadas (0,5 e 1,0 kg) apresentaram estatisticamente os melhores resultados e a COV 4,5 foi limitante ao processo anaeróbio. Quanto à relação SV/ST, os melhores valores obtidos ocorreram com TDH de 7 dias (OP II) na qual o lodo efluente ao digestor apresentou reduzido conteúdo orgânico (<45%).

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - AWWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WPCF. (2005) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21<sup>a</sup> ed. Washington DC.
- APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. (2008) Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, p. 755-81.
- ATHANASOULIA, P.; MELIDIS, P.; AIVASIDIS, A. (2012) Anaerobic waste activated sludge co-digestion with olive mill wastewater. *Water Science and Technology*, v. 65, n. 12, p. 2251- 57.
- BOLZONELLA, D.; PAVAN, P.; BATTISTONI, P.; CECCHI, F. (2005) Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. *Process Biochemistry*, v. 40, n. 3, p. 1453-60.
- CHEN, Y.; FU, B.; WANG, Y.; JIANG, Q.; LIU, H. (2012) Reactor performance and bacterial pathogen removal in response to sludge retention time in a mesophilic anaerobic digester treating sewage sludge. *Bioresource Technology*, v. 106, p. 20-26.
- DE LA RUBIA, M.A.; PEREZ, M.; ROMERO, L.I.; SALES, D. (2002) Anaerobic mesophilic and thermophilic municipal sludge digestion. *Chemical and Biochemical Engineering*, v. 16, n. 3, p. 119-24.
- DOHÁNYOS, M. & ZÁBRANSKÁ, J. (2001) Anaerobic digestion. In: SPINOSA, L. & VESILIND P.A. (Eds). *Sludge into biosolids*, IWA Publishing, United Kingdom, p. 223-241.
- GAVALA, H.N.; YENAL, U.; SKIADAS, I.V.; WESTERMANN, P.; AHRING, B.K. (2003) Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge: effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Research*, v. 37, n. 19, p. 4561-4572.
- GE H.; JENSEN, P.D.; BATSTONE D.J. (2011) Temperature phased anaerobic digestion increases apparent hydrolysis rate for waste activated sludge. *Water Research*, v. 45, n. 4, p. 1597-1606.
- GRIFFIN, M.; MCMAHON, K.D.; MACKIE, R.; RASKIN, LUTGARDE. (1998) Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 57, n. 3, p. 342-355
- MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRÉS, P. (2000) Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, v. 74, p. 3-16.
- LEE, I. & RITTMANN, B.E. (2012) Effect of low solids retention time and focused pulsed pre-treatment on anaerobic digestion of waste activated sludge. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 3, p. 2542-2548.
- MAHMOUD, N.; ZEEMAN, G.; GIJZEN, H.; LETTINGA, G. (2003) Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review. *Bioresource Technology*, v. 90, p. 1-9.
- MALINA Jr, J. & POHLAND, F.G. (1992) Design of anaerobic process for the treatment of industrial and municipal wastes. In: MALINA Jr, J. & POHLAND, F.G. (Eds). *Water quality management library*, v. 7, 213 p.
- METCALF, L. & EDDY, H. (2003) *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1819 p.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C.; HUBELE, N.F. (2006) *Engineering Statistics*. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 512 p.
- NAGAO, N.; TAJIMA, N.; KAWAI, M.; NIWA, C.; KUROSAWA, N.; MATSUYAMA, T.; YUSOFF, F.M.; TODA, T. (2012) Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*, v. 118, p. 210-218.
- NAJAFPOUR, G.D.; ZINATIZADEH, A.A.L.; MOHAMED, A.R.; ISA, M.H.; NASROLLAHZADEH, H. (2006) High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. *Process Biochemistry*, v. 41, p. 370-379.
- NGES, I.A. & LIU, J. (2010) Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered-sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions. *Renewable Energy*, v. 35, p. 2200-2206.
- OROPEZA, M.R.; ORTIZ, P.C.; CHARLESTON, S.O.; ROBLES, A. (2000) Digestión anaerobia mesofílica y termofílica de lodos biológicos de desecho y lodos de tratamiento primario avanzado. In: Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, 12 *Memorias técnicas...* México, D.F: AIDIS, p. 1-15.
- PARKIN, G.F. & OWEN, W.F. (1986) Fundamentals of anaerobic digestion. *Journal of Environmental Engineering*, v. 112, n. 5, p. 867-920.
- RUBAL, J.S.; CORTACANS TORRE, J.A.; DEL CASTILLO GONZÁLEZ, I. (2012) Influence of temperature, agitation, sludge concentration and solids retention time on primary sludge fermentation. *International Journal of Chemical Engineering*, v. 2012, p. 1-8.
- RUBIO-LOZA, L.A. & NOYOLA A. (2010) Two-phase (acidogenic-methanogenic) anaerobic thermophilic/mesophilic digestion system for producing Class A biosolids from municipal sludge. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 576-585.
- SONG, Y.-C.; KWON, S.-J.; WOO, J.-H. (2004) Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic and thermophilic digestion of sewage sludge. *Water Research*, v. 38, p. 1653-1662.
- SPEECE, R.E. (1996) *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*. Tennessee: Archea Press, 416 p.
- SPINOSA, L. & VESILIND, P.A. (2001) *Sludge into biosolids: processing, disposal, utilization*. London: IWA Publishing, 400p.
- WANG, Q.; NOGUCHI, C.; HARA, Y.; SHARON, C.; K. KAKIMOTO, K.; KATO, Y. (1997) Studies on anaerobic digestion mechanism: influence of pretreatment temperature on biodegradation of waste activated sludge. *Environmental Technology*, v. 18, n. 10, p. 999-1008.
- WEI, L.-L.; ZHAO, Q.-L.; HU K.; LEE, D.-J.; XIE C.-M.; JIANG, J.-Q. (2011) Extracellular biological organic matters in sewage sludge during mesophilic digestion at reduced hydraulic retention time. *Water Research*, n. 45, p. 1472-1480.