

## III-361 - OPERAÇÃO DE UM REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE EM BATELADAS SEQUENCIAS PARA AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE METANO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CEAGESP

**Mario Jose Lucero Culi<sup>(1)</sup>**

Professor na Faculdade de Arquitetura e Engenharia, da Universidad Católica de El Salvador (UNICAES), El Salvador. Engenheiro Civil pela Universidade de El Salvador, El Salvador. Mestre em Ciências da Engenharia Química pela Universidad Federico Santa María, Valparaíso, Chile (UTFSM). Doutorando em Hidráulica e Ambiental, na Escola Politécnica da USP (EP-USP).

**Ronan Cleber Contrera**

Professor Doutor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da USP (EP-USP). Engenheiro Civil pela Escola de São Carlos (EESC/USP). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Ave. Prof. Almeida Prado no. 83, trav. 2 – Cidade Universitária – Butantã - SP Brasil - Tel: (11) 3091-1897- e-mail: [luceroctuli@gmail.com](mailto:luceroctuli@gmail.com)

### RESUMO

Brasil gera 180.000 t/d de resíduos sólidos, dos quais um 51% é matéria orgânica, portanto, o tratamento de resíduos sólidos é um ponto importante gestão fundamentado na Política Nacional de Resíduos Sólidos do ano 2010. O presente trabalho consiste na avaliação da taxa de geração de metano utilizando resíduos orgânicos coletados CEAGESP, através de um reator anaeróbico de fluxo ascendente com recirculação de lixiviado. O tempo de reação foi de 14 d e massa de resíduos introduzida no reator foi de 750 g. O volume de lixiviado usado foi de 7,0 L. A temperatura foi controlada mediante uma câmara de aquecimento em  $30 \pm 2$  °C. A taxa de biogás obtida na média foi de 0,52 m<sup>3</sup> biogás/kg SV e uma porcentagem de metano de 68%, obtendo uma taxa de metano de 0,36 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV. A eliminação de SV nas bateladas com resíduo do CEAGESP foi de 82% na média. Os dados de geração refletem o potencial encontrado na fração orgânica dos resíduos sólidos gerados no CEAGESP com possibilidade de aproveitar energeticamente os mesmos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biogás, Digestão Anaeróbia, Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Municipais.

### INTRODUÇÃO

A problemática dos resíduos sólidos (RS) é uma tarefa difícil no mundo todo, pois é um dos principais problemas de saneamento ambiental em escala global. De acordo com estatísticas do Banco Mundial, a população urbana no mundo para o ano 2005, era de 2,980 bilhões de pessoas no mundo, com uma geração aproximada de resíduos igual a 3.532.252 t/d (HOORNWEG; PERINAZ, 2012). Outro fator importante que evidencia a problemática dos resíduos sólidos no mundo é a forma de disposição dos resíduos, predominando até o ano 2012 os aterros sanitários, e em países de renda média ou baixa, os lixões (HOORNWEG; PERINAZ, 2012).

Brasil, em 2010, instituiu uma Política Nacional de Resíduos Sólidos, que tem por objetivo estabelecer estratégias que ajudassem a resolver o problema dos resíduos; por meio da Lei nº 12.305, de 2010 e regulamentada no Decreto 7.704, de 2010 (BRASIL, 2010b). Ela estabelece diretrizes para gestão integrada dos RS considerando o desenvolvimento sustentável, e as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social com elementos fundamentais da gestão (BRASIL, 2010a).

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, Brasil tinha no ano 2008 uma população urbana de 159.961.545 habitantes gerando 183.481 t/d de resíduos (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011); resultando em uma produção per-capita de 1,1 kg/hab.d (Ministério de Meio Ambiente, 2011). A Composição gravimétrica dos RS foi como segue: 51,2% de matéria orgânica, 34,5% de recicláveis e 14,3% de rejeitos (Ministério de Meio Ambiente, 2011). Em Brasil a forma de disposição final de resíduos no ano 2015 de

acordo a ABRELPE (2016) foi a seguinte: Aterro sanitário 58,7%, Aterro sanitário controlado, 24,1% e lixões 17,2%.

A cidade de São Paulo, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2014), apresentou no ano 2010 uma população de 11.253.503 pessoas; a geração total de Resíduos Sólidos Urbanos, RSU da cidade de São Paulo no ano 2014 foi de 14.635,84 t/d (Ministério das Cidades, 2016); e a composição gravimétrica dos RSU, de acordo ao Plano de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos da cidade de São Paulo, possui 51,2% de matéria orgânica, 34,5% de recicláveis e 14,3% de rejeitos (Secretaria Municipal de Serviços, 2014).

A digestão anaeróbia, DA, consiste na degradação da matéria orgânica por microrganismos em condições anaeróbias cujo ação metabólica gera biogás (CHERNICHARO, 2016). A composição do biogás são principalmente CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> com porcentagens que oscilam entre 55-75% e 30-45%, respectivamente (HILKIAH et al., 2008). A DA se realiza em quatro estágios: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (APPELS et al., 2008). A solubilização é a etapa crítica da DA devido ao estado particulado do sólido e que os microrganismos requeiram da matéria orgânica em forma solúvel para ser degradada a outros compostos (GRAUNKE; WILKIE, 2014).

## **OBJETIVO**

Avaliar o potencial de geração do metano do reator anaeróbio de fluxo ascendente com resíduos coletados no CEAGESP.

## **METODOLOGIA**

As amostras de resíduos usadas na pesquisa foram coletadas na Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo, CEAGESP, localizado na Vila Leopoldina, São Paulo; de endereço: Av. Dr. Gastão Vidigal, 1946 - Vila Leopoldina, São Paulo - SP, 05316-900. Os resíduos foram coletados em diversos pontos dentro do CEAGESP de acordo as sugestões dos funcionários do mesmo. Eles manifestaram não ter estudos de composição gravimétrica dos resíduos, pelo qual, optou-se por estimar uma composição com o auxílio dos funcionários. Para o qual, considerou-se três tipos de frações de resíduos, as quais são:

- a. Folhas: Alface, couve, cebolinha, acelga, casca de milho, erva doce.
- b. Legumes: cebola, batata, quiabo, berinjela, rabanete, pepino, abobrinha, tomate, jiló, pimentão, vagem.
- c. Frutas: Maçã, carambola, melancia, abacate, tangerina, maracujá, melão, atemóia, manga, laranja, abacaxi, pêssego e mamão.

Depois de separadas as frações, cada uma delas foi triturada e pesada em separado, utilizando-se um picador forrageiro - GP-1500AB. Cada amostra foi pesada usando uma balança de laboratório não analítica, com um peso de 750 g cada uma, definido por: 150 g de folhas, 300 g de legumes e 300 g de frutas. Após a composição, cada amostra foi acondicionada em um recipiente plástico de 1 L, depois numerada e congelada. Antes de usar cada amostra, ela foi descongelada com 24 h de antecedência em um recipiente estanque para não se perder nem os líquidos que possam se formar no descongelamento. As características iniciais do resíduo apresenta-se na Tabela 1.

**Tabela 1: Características de sólidos do resíduo cru coletado no CEAGESP**

Amostra	Peso amostra	Água	ST	SV	SF	SV/ST	SV/Amostra
	g	g	g	g	g	g/g	g/g
1	50,2836	45,0246	5,2590	4,7680	0,4910	0,9066	0,0948
2	50,2331	44,9191	5,3140	4,7970	0,5170	0,9027	0,0955
3	50,5319	45,2089	5,3230	4,8200	0,5030	0,9055	0,0954
4	50,2209	44,9339	5,2870	4,7770	0,5100	0,9035	0,0951
5	50,0600	44,501	5,5590	5,0750	0,4840	0,9129	0,1014
Média	50,2659	44,9175	5,3484	4,8474	0,5010	0,9063	0,0964
DP	0,1135	0,1666	0,0842	0,0910	0,0108	0,0028	0,0020
Composição	100,0000	89,4%	10,6%	9,6%	1,0%		

OBS: DP = Desvio Padrão.

O inóculo usado no reator anaeróbio foi coletado no fundo de uma lagoa anaeróbia de lixiviado do aterro sanitário de São Carlos-SP, o qual atualmente (2017) se encontra desativado. E o lixiviado utilizado no experimento teve origem no aterro operado por Estre Ambiental da cidade Paulina em São Paulo. O lixiviado foi coletado pela própria Estre e entregue no laboratório de saneamento da USP.

A configuração do reator foi de fluxo ascendente com uma capacidade de lixiviado de 7,0 L, com recirculação por bombeamento do meio líquido, isso propiciava a hidrólise da matéria orgânica; e o líquido era introduzido na parte inferior do reator. A temperatura interna do reator foi de  $30 \pm 2$  °C e a medição do biogás realizou-se com um dispositivo de deslocamento de água Mariotte. A composição do gás foi feita com instrumento contendo água com NaOH para reagir com o CO<sub>2</sub>.

Os principais parâmetros de medição foram os apresentados na Tabela 2. As análises físico-químicas foram realizadas, seguindo os métodos constantes no APHA; AWWA e WEF (2005).

**Tabela 2: Parâmetros de seguimento do experimento.**

PARÂMETROS	TÉCNICA ANALÍTICA	UNIDADE
pH	Direto, Potenciométrico	-----
ST	Standard Methods, gravimétrico	g
SV	Standard Methods, gravimétrico	g
Biogás	Dispositivo Mariotte	mL
Temperatura	Direta, Termômetro Digital	°C

## RESULTADOS

Os resultados obtidos durante as 4 bateladas com Tempo de Detenção Hidráulico, TDH, de 14 d foram os seguintes:

## BIOGÁS

A geração de biogás acumulada apresenta-se na Figura 1, na qual apresenta-se a geração acumulada de biogás das 4 bateladas, atingindo uma geração última seguinte: B1 uma geração de 37.735 mL, B2 de 37.960 mL, B3 de 37630 mL e B4 de 37855 mL; no final dos 14 d.

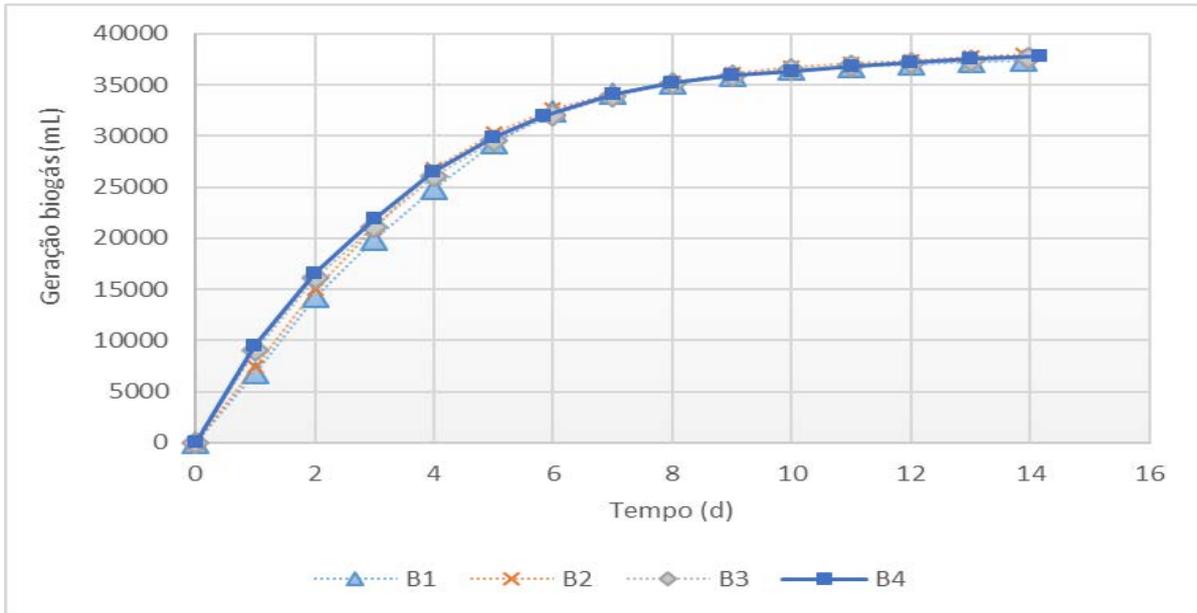


Figura 1: Geração acumulada de biogás

Na Figura 2 apresenta-se a geração diária de biogás, na qual observa-se que a diferença entre as bateladas B1 e B2 com respeito as bateladas B3 e B4 é significativa entre os dias 1 e 2; principalmente no pico de geração. Os picos de geração de cada foram os seguintes: B1 7500 mL, B2 7600 mL, B3 9020 mL e B4 9460 mL.

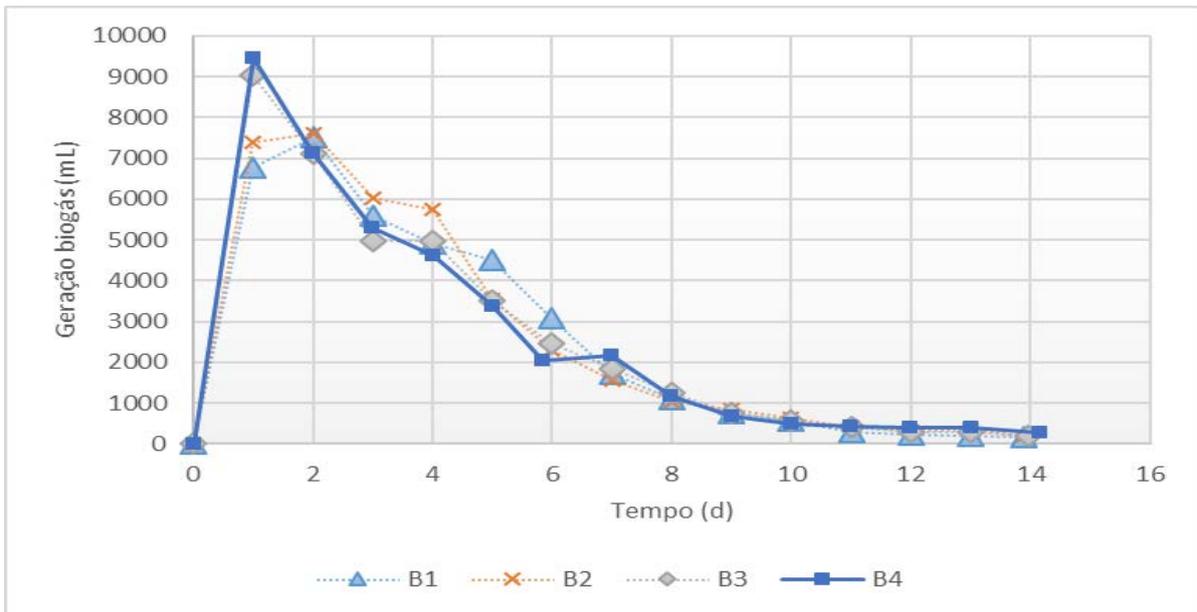
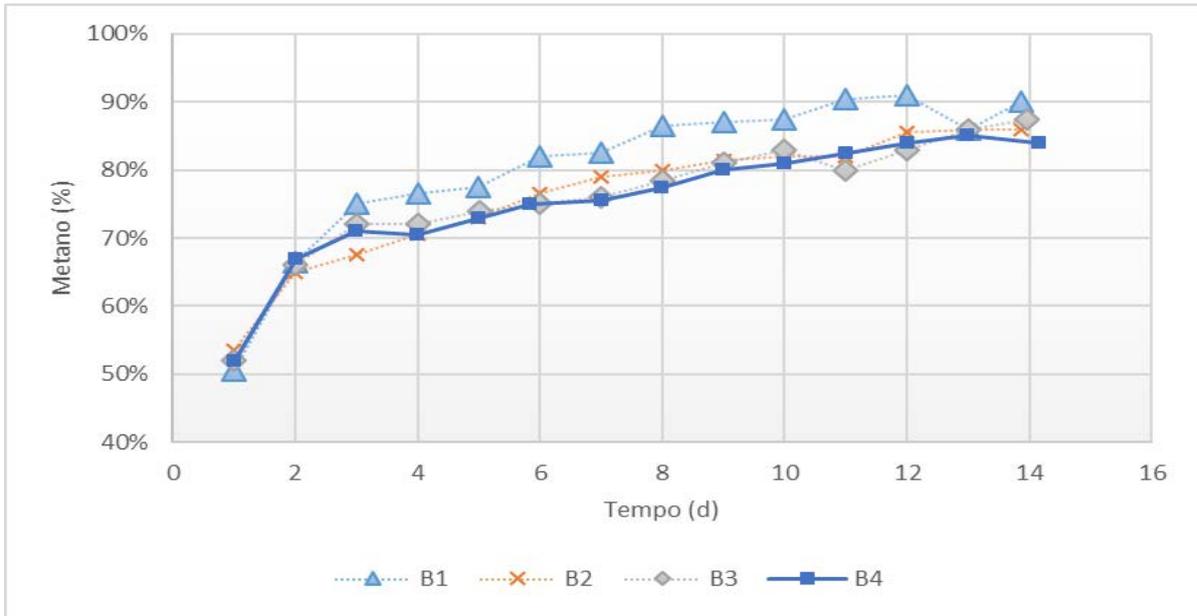


Figura 2: Geração diária de biogás

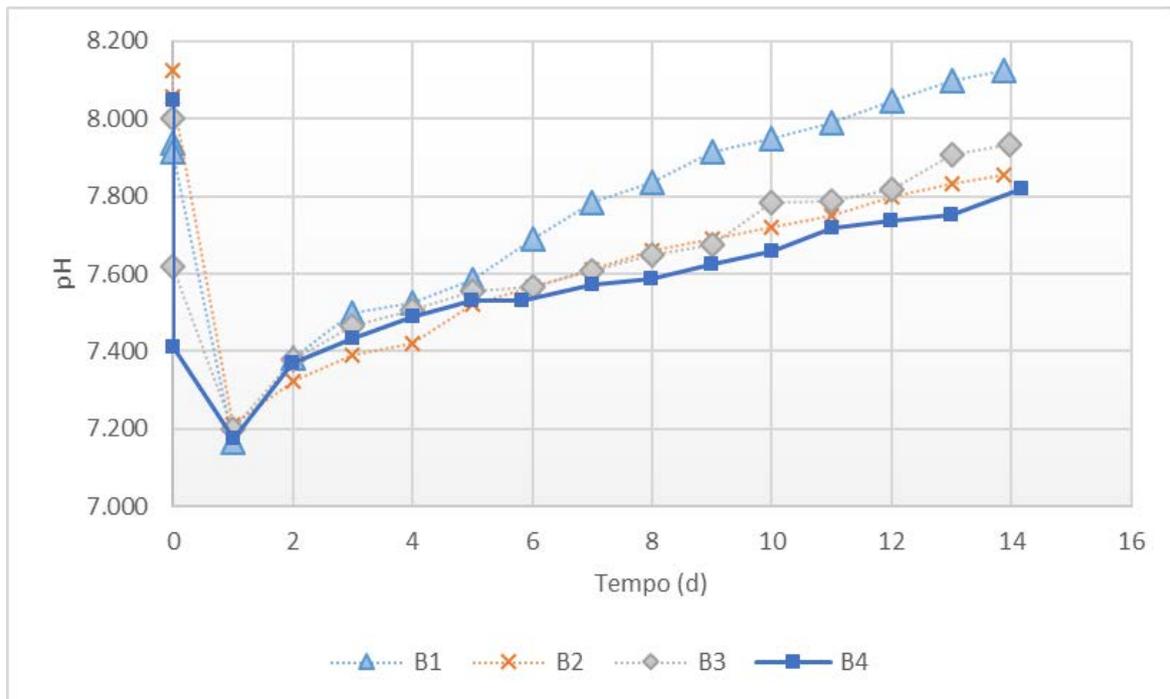
A composição do biogás, expressado em porcentagem de metano apresenta-se na Figura 3.



**Figura 3: Porcentagem de metano no biogás**

### pH

O pH durante as bateladas apresentou o comportamento mostrado na Figura 4. O valor do pH inicial se situa entre 7,9 e 8,10 nas amostras zero, antes do começo da batelada, e posteriormente, devido ao processo de acidificação o pH chega até 7,1 e 7,2. A partir do segundo ele começa a subir até chegar a valores próximos do pH inicial.



**Figura 4: pH**

## TEMPERATURA

A tendência da temperatura interna do reator apresenta-se na Figura 5. Nela pode-se observar que a faixa de temperatura oscilou entre 28 e 32 °C, a exceção do primeiro dia que esteve entre 26 e 28,5 °C, devido a que para trocar resíduo a câmara devia permanecer aberta.

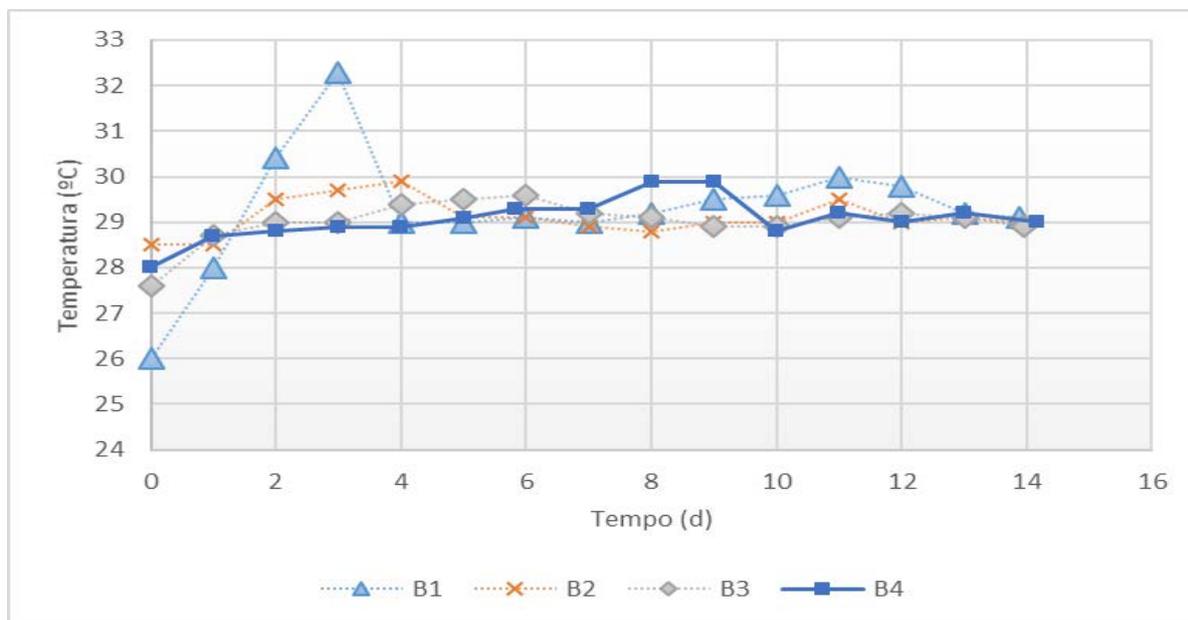


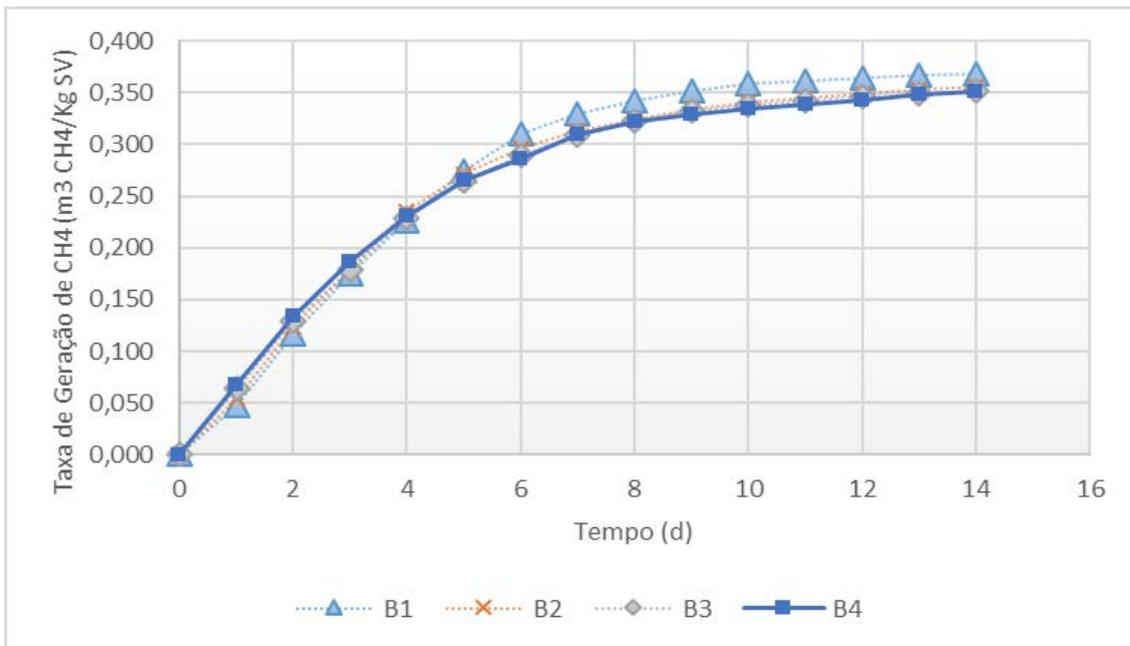
Figura 5: Temperatura interna do reator

Na Tabela 3 apresentam-se as taxas de geração de biogás e gás metano finais resumindo os resultados obtidos da pesquisa. E cujo comportamento cinético apresenta-se na Figura 6.

Tabela 3: Taxas de geração de biogás e gás metano

Batelada	Volume		SV <sub>introduzidos</sub>	SV <sub> finais</sub>	% Elim. SV	TDH d	Taxa de Geração		% Metano
	Biogás	CH <sub>4</sub>					Biogás m <sup>3</sup> biogás/ Kg SV	Metano m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / Kg SV	
	mL	mL							
B1	37375	26673	72,3301	12,4102	82,8%	14	0,52	0,37	71%
B2	37960	25705	72,3301	11,6554	83,9%	14	0,52	0,36	68%
B3	37630	25427	72,3301	10,5569	85,4%	14	0,52	0,35	68%
B4	37855	25391	72,3301	11,5408	76,3%	14	0,52	0,35	67%
Média	37705	25799		12,9455	82,0%		0,52	0,36	68%
DP	203	437		2,1070	0,007		0,003	0,005	1%

As taxas de geração ao longo das bateladas apresenta-se na Figura 6. Nela aprecia-se que a cinética das taxas de geração foi muito próxima tendo pouca diferença entre as bateladas; a média foi de 0,36 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Kg SV. O comportamento da taxa de geração foi levemente maior para batelada B1 em comparação as bateladas B2, B3 e B4.



**Figura 6: Taxa de geração de metano**

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Figura 1 apresenta-se a geração acumulada de biogás das 4 bateladas, atingindo uma geração acumulada média de 37.655 mL com um desvio padrão de 203 mL. Nela pode-se perceber que as primeiras duas bateladas (B1 e B2) tiveram uma menor geração entre os dias 1 e 4; posteriormente as curvas coincidem na geração de biogás. Essa diferença evidência-se na Figura 2, nos picos de geração (dia 1 e 2); a média dos picos de geração das bateladas B1 e B2 foi de 7.550 mL no dia 2 e para as bateladas B3 e B4 foi de 9240 mL no dia 1. A diferença entre médias foi de 1690 mL; essa diferença pode-se dever a adaptação dos micro-organismos ao tipo de resíduo introduzido aumentando a velocidade de digestão da matéria nas bateladas B3 e B4.

A Taxa de geração média obtida usando resíduos do CEAGESP foi de 0,52 m<sup>3</sup> biogás/kg SV, com uma porcentagem de metano de 69%; e, portanto, uma geração de metano de 0,36 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV, com TDH de 14 d. Nasir, Ghazi e Omar (2012) reportam gerações de metano para Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos, FORSU, de 0,15 a 0,43 m<sup>3</sup>/kg SV e para resíduos vegetais (frutas, legumes, entre outros) uma geração de 0,32 m<sup>3</sup>/kg SV. Gunaseelan (1997) apresenta taxas de geração com resíduos vegetais de 0,03 a 0,51 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV com diversos tipos de reatores.

A porcentagem de metano foi de 68% na média, cuja composição deveria estar entre 55 e 75% de acordo a Hilkiyah et al., (2008). A porcentagem de eliminação de sólidos voláteis foi de 82% na média; de acordo a Nasir, Ghazi e Omar (2012) para resíduos de frutas reportaram que se pode atingir uma eliminação de 79 a 81%. Enquanto Gunaseelan (1997) reportou para resíduos de frutas e legumes redução de 90 – 98% de SV com reatores não convencionais e operados a 35 °C. O pH esteve em uma faixa de 7,2 até 8,1 como média nas quatro bateladas.

## CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Os resultados apresentados da configuração do reator aprestam resultados favoráveis enquanto a geração de biogás obtendo uma taxa média de 0,52 m<sup>3</sup> biogás/kg SV e de 0,36 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV de gás metano; propiciando o aproveitamento energético dos resíduos orgânicos do CEAGESP.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015. São Paulo, Brasil, 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2017.
2. APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, n. 6, p. 755–781, 2008.
3. APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. Washington: American Public Health Association, 2005. 1368p.
4. BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº. 12.395. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 2 de agosto de 2010a. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 17 abr. 2017.
5. BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Decreto nº. 7.404. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 23 de dezembro de 2010b. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 17 abr. 2017.
6. CHERNICHARO, C. **Reatores anaeróbios**. 2a ed. Belo Horizonte, Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2016.
7. GRAUNKE, R. E.; WILKIE, A. C. Examining the mechanisms of short-term solubilization of ground food waste for high-rate anaerobic digestion. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 86, p. 327–333, 2014.
8. GUNASEELAN, V. Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 13, n. 1–2, p. 83–114, 1997.
9. HILKIAH IGONI, A.; AYOTAMUNO, M. J.; EZE, C. L.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S.D. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied Energy*, v. 85, n. 6, p. 430–438, 2008.
10. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Caderno de Diagnóstico Resíduos Sólidos. Brasília, 2011. 188 p. Disponível em: <[http://www.cidadessustentaveis.org.br/sites/default/files/arquivos/01\\_residuos\\_solidos\\_urbanos\\_1.pdf](http://www.cidadessustentaveis.org.br/sites/default/files/arquivos/01_residuos_solidos_urbanos_1.pdf)>. Acesso em: 14 de set. 2014.
11. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Informações Estadísticas São Paulo. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/493>>. Acesso em: 30 jan. 2016.
12. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Diagnostico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2014**. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2014>>. Acesso em: 16 fev. 2016.
13. MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2011. 103 p. Disponível em: <[http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS\\_Revisao\\_Decreto\\_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657](http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657)>. Acesso em 14 set. 2014.
14. SÃO PAULO (Estado). Secretaria Municipal de Serviços. **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade de São Paulo**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf>>. Acesso em: 2 fev. 2016.
15. HOORNWEG, D.; PERINAZ B. **What a waste: a global review of solid waste management. Urban development series knowledge papers**. Washington, United States: World Bank, v. 15, 2012. 98 p.
16. NASIR, I. M.; GHAZI, T. I. M.; OMAR, R. Production of biogas from solid organic wastes through anaerobic digestion: A review. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 95, n. 2, p. 321–329, 2012.