

26º. Encontro Técnico AESABESP

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES EM UM DIGESTOR ANAERÓBIO OPERADO EM BATELADAS SEQUENCIAIS

Katia Cristina da Cruz Silva⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) e Mestranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP (EP-USP).

Ronan Cleber Contrera

Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da USP (EP-USP).

Dione Mari Morita

Professora do Departamento de Ciências Básicas e Ambientais da Escola de Engenharia de Lorena (EEL-USP)

Endereço⁽¹⁾: Avenida Prof. Almeida Prado, 83 trav. 2, Cidade Universitária, CEP: 05508-900, São Paulo, SP - Brasil - Tel: +55 (11) 3091-1897, e-mail: Katita.cris@gmail.com

RESUMO

A matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) representa um grande problema ambiental na atualidade, pois representa cerca de 50% da massa total dos RSU e seu tratamento é praticamente desprezível no Brasil. O presente trabalho avaliou o potencial de geração de biogás e metano da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares em um digestor anaeróbio operado em bateladas sequenciais com tempos de reação decrescentes de 37 a 22 dias. A cada batelada, cerca de 410 g de resíduos orgânicos eram digeridos em um reator de aproximadamente 15,6 L operado à temperatura controlada de $32\pm 2^\circ\text{C}$, mantido dentro de uma câmara provida de aquecedor e recirculador de ar. O biogás era medido por deslocamento de líquido utilizando-se um frasco de Mariotte e o volume de metano era obtido reagindo-se o biogás com NaOH. Cada batelada produziu em média 46,04 L de biogás medido à temperatura ambiente, o que correspondia a uma produção de aproximadamente $674 \text{ mL}_{\text{Biogás}} \cdot \text{g}_{\text{STV}}^{-1}$. O conteúdo de metano do biogás era de aproximadamente de 64,4%, o que levava a uma produção de aproximadamente $434 \text{ mL}_{\text{Metano}} \cdot \text{g}_{\text{STV}}^{-1}$. Os resultados obtidos revelam o grande potencial de geração de metano deste resíduo, com possível viabilidade para aproveitamento energético.

PALAVRAS-CHAVE: Digestão anaeróbia, Resíduos sólidos orgânicos, Biogás.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a problemática dos resíduos sólidos só ganhou importância com a Lei n.º 12305 (BRASIL, 2010), que estabeleceu a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), no qual as municipalidades passaram a ter mais responsabilidade na gestão dos resíduos, não somente com relação à disposição final adequada, mas também com a ordem de prioridades estabelecida em seu artigo 9º: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e por último, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2014), a geração total de RSU no Brasil em 2013 foi de 76.387.200 toneladas, no qual apenas 58,3 % foram dispostas adequadamente em aterros sanitários em 2013.

Considerando-se que mais de 50% da massa dos RSU coletados no Brasil é composta por fração orgânica facilmente biodegradável, a situação fica ainda mais crítica, pois segundo o IPEA (2012), somente 1,6% dessa fração é tratada, sendo o restante disposto em aterros e lixões.

Experiências no tratamento da fração orgânica ainda são incipientes no país. O resíduo orgânico, por não ser coletado em separado, acaba sendo encaminhado para disposição final junto com os demais resíduos de difícil

biodegradação que deixaram de ser coletados de maneira seletiva. Esta forma de destinação gera, para a maioria dos municípios, despesas que poderiam ser evitadas caso a matéria orgânica fosse separada na fonte e encaminhada para um tratamento específico, por exemplo, via digestão anaeróbia, compostagem ou tratamento térmico. Portanto, evitando-se o depósito da fração orgânica facilmente biodegradável em aterro, permite-se aumentar a sua vida útil, ou que sejam construídos aterros menores, além de contribuir para diminuição da emissão de metano nos locais onde ele não é capturado ou queimado, minimizando, assim, o impacto no efeito estufa (NAIK, TKACHENKO, WUNG, 2013). Salienta-se ainda, que o tratamento da fração orgânica em sistemas de digestão anaeróbia propicia, também, a geração de energia renovável por meio da produção de biogás, bem como a utilização do subproduto na agricultura, após tratamento adicional.

Desta forma este trabalho procurou avaliar o potencial de produção de metano da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares em uma configuração de reator operada em bateladas sequenciais, que permite um maior controle operacional do processo.

OBJETIVO

Avaliar o potencial de produção de metano da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares em uma configuração de reator operada em bateladas sequenciais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Visando-se garantir a homogeneidade das amostras de resíduos orgânicos durante a investigação experimental, procedeu-se como descrito a seguir:

Inicialmente, pequenas porções diárias da matéria orgânica dos resíduos descartados em uma residência foram armazenadas em sacos plásticos de polietileno de baixa densidade (PEBD), de 5 L, e mantidas em refrigeração a 4 ± 2 °C até se obter aproximadamente 8 kg. Concluída esta etapa, cada embalagem refrigerada foi aberta; e feita a separação dos seus conteúdos nas seguintes frações:

- cascas e restos de frutas;
- restos de massas de pães e pizzas;
- folhas e talos vegetais (verduras e jardinagem);
- cascas de ovos;
- pó de café e papel filtro;
- restos e cascas de legumes;
- restos de carnes, peles e gorduras;
- grãos e cereais cozidos ou não, sementes e restos das frações anteriores, que devido à pequena quantidade ou estado de deterioração, não foi possível a total separação.

Separadas as frações, elas foram picadas em dimensões menores que 2,0 cm, utilizando-se uma faca de cozinha, e em seguida, cada fração foi pesada em uma balança semi-analítica. Definido o número de amostras que seriam utilizadas na investigação experimental, cada amostra foi composta por uma parte proporcional em massa de cada fração dos resíduos separados, com conteúdo médio conforme a Tabela 01. Destarte, procurou-se obter amostras representativas, composta por frações orgânicas de fácil, média e difícil biodegradação e até inorgânica, bem como com composições semelhantes entre si, para que fossem possíveis comparações entre os resultados das diferentes bateladas. As amostras foram conservadas congeladas em um freezer a -20 °C.

Dentre as amostras de resíduos sólidos armazenadas e congeladas para realização do experimento, uma delas foi selecionada para caracterização, também aleatoriamente. A amostra selecionada foi a número 05, que foi descongelada e, posteriormente, triturada em um processador de alimentos por aproximadamente 5 minutos até se tornar uma massa homogênea com consistência pastosa. Dessa massa de aproximadamente 410 g, foram coletadas 4 amostras de aproximadamente 50 g cada, que foram utilizadas para realização das análises de sólidos e umidade; o restante foi novamente congelado para realização posterior de análises químicas.

Com os resultados dessas quatro amostras, obtiveram-se as médias e os desvios padrão, que foram utilizados como referência para se estimar as características dos resíduos no início de cada batelada.

Ao final de cada batelada, o resíduo tratado foi recolhido no digestor, incluindo fragmentos e material particulado que ficou aderido ou escapou para as mangueiras. Esse material foi quantificado por pesagem, obtendo-se a sua massa úmida e na sequência, ele foi homogeneizado com uma colher e separado em três frações para realização das análises de sólidos e umidade.

Tabela 01 - Composição média das amostras de acordo com suas frações constituintes.

Amostra	Massa de cada componente [g]								Total [g]
	Cascas de Frutas	Massas de Pães e Pizzas	Folhas e Talos Vegetais	Cascas de Ovos	Pó e filtro de Café	Restos e Cascas de Legumes	Carnes	Restos Finais	
Média	132,59	23,99	48,16	2,00	46,12	41,20	15,01	125,34	434,41
DP	0,12	0,08	0,09	0,00	0,17	0,13	0,08	0,18	0,38
Fração [%]	30,52	5,52	11,09	0,46	10,62	9,48	3,45	28,85	100,00

OBS: DP = Desvio Padrão.

A biomassa utilizada como inóculo foi coletada no fundo de uma lagoa anaeróbia de lixiviados desativada do antigo aterro sanitário de São Carlos-SP.

O lixiviado utilizado nesta pesquisa como meio de recirculação era proveniente do aterro sanitário que pertence ao Centro de Gerenciamento de Resíduos (CGR) da cidade de Paulínia-SP, administrado pela Estre Ambiental.

O digestor proposto para esta pesquisa possuía aproximadamente 15,6 L de volume total e uma bomba de recirculação externa que bombeava o lixiviado da parte superior do reator e o reintroduzia na parte inferior produzindo um fluxo ascendente, que favorecia digestão da matéria orgânica dissolvida e a liberação do biogás. A bomba utilizada para recirculação dos líquidos era do tipo diafragma e bombeava por dia um volume igual a 12 vezes o volume do sistema.

Para que o sistema fosse mantido em temperatura controlada de 32 ± 2 °C (mesofílica), ele foi montado dentro de um armário de madeira com portas, que possuía no interior uma fonte de calor (duas lâmpadas incandescentes), um sistema de recirculação de ar (ventilador) e um termostato para controle da faixa de temperatura. O frasco de Mariotte, utilizado para medição do biogás gerado no sistema possuía capacidade de 10 L.

Com base em uma batelada teste, chamada neste experimento de “batelada zero”, foi definida a duração máxima das bateladas (37 dias) e um protocolo de amostragem dos líquidos de recirculação e gases gerados, o qual é ilustrado na Tabela 02.

Tabela 02 – Amostragens de líquidos e gases ao longo das bateladas.

Tipo de Amostra	Pontos de amostragem ao longo da batelada [dias]																																						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
Líquida	X	X	X	X	X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X
Gasosa	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Ao se iniciar a operação do sistema com resíduos, a duração de cada batelada foi variável até que o sistema atingisse baixa produção de gás (< 1,0% do volume acumulado até o momento) e essa produção coincidissem com um dos pontos de amostragem ilustrado na Tabela 02.

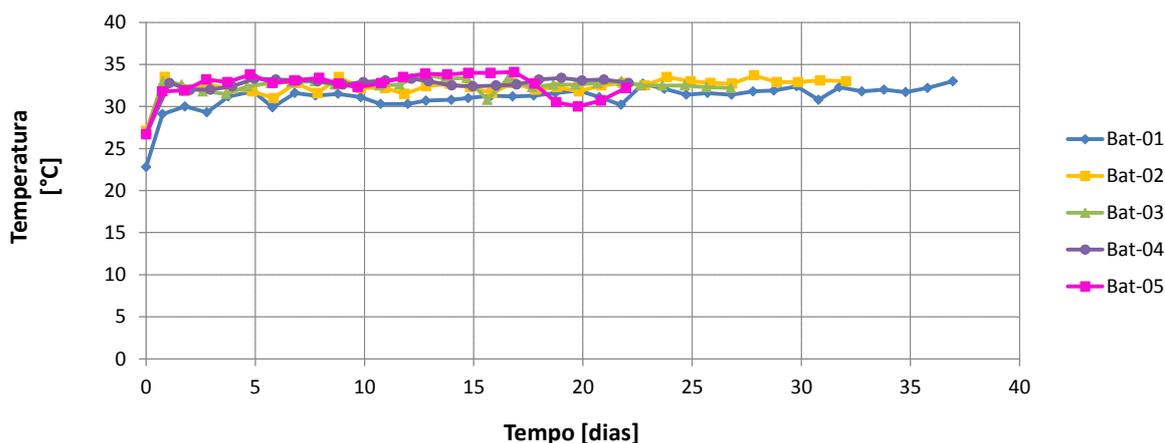
As análises físico-químicas foram realizadas, seguindo os métodos constantes no APHA; AWWA e WEF (2005).

RESULTADOS

Até o presente momento só se procederam 5 bateladas desta pesquisa que ainda está em andamento, todavia os resultados são bastante promissores, como podem ser observados a seguir.

Na Figura 01 é ilustrada a variação da temperatura interna dos reatores em função do tempo para as bateladas 01 a 05. No início de cada batelada, o sistema se encontrava aproximadamente à temperatura ambiente e demorava cerca de um a dois dias para se estabilizar na faixa de temperatura desejada (32 ± 2 °C).

Figura 01 –Variação da temperatura ao longo do tempo no sistema (bateladas 01 a 05).

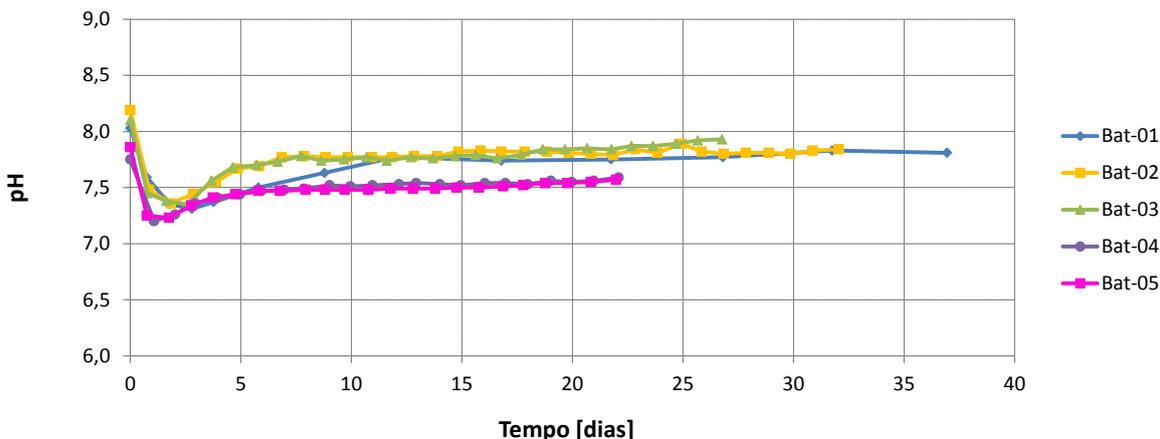


A batelada 01 apresentou a menor média de temperatura durante os seus 37 dias de operação, ficando em $31,1 \pm 1,6$ °C, devido a ajustes iniciais e também por ter sido realizada em um mês mais frio que os demais (agosto). Todavia, a temperatura média ficou dentro da faixa mesofílica e ainda assim, próxima à desejada. As bateladas 02, 03, 04 e 05 apresentaram temperaturas médias iguais a $32,3 \pm 1,1$ °C; $32,4 \pm 1,2$ °C; $32,6 \pm 1,3$ °C e $31,9 \pm 2,4$ °C, respectivamente, sendo que a 05 ainda não foi finalizada. De forma geral, as temperaturas médias ficaram dentro das faixas desejadas e muito próximas entre si, tornando o efeito da variação de temperatura praticamente irrelevante entre as bateladas.

Como o sistema trabalha com alta taxa de recirculação de líquidos, a variação do pH entre os reatores pode ser considerada irrelevante e sua medida está sendo feita somente na saída do reator de resíduos. A variação do pH em função do tempo é ilustrada na Figura 02, na qual se observa que as bateladas eram iniciadas com pH na faixa de 7,8 a 8,2, e por meio da hidrólise e acidificação do resíduo, chegavam a um pH mínimo entre os dias 1 e 3, situado na faixa de 7,2 a 7,4, aumentando novamente a partir destes dias e estabilizando aproximadamente a partir do sétimo dia de operação, em uma faixa de 7,5 a 7,9, ou seja, sempre abaixo dos valores iniciais das bateladas e dentro do intervalo considerado ótimo para as arqueias metanogênicas, entre 6,5 e 8,0 (LETTINGA ASSOCIATES FOUNDATION, 2009). Acredita-se que o pH não retornava a valores próximos dos iniciais devido ao equilíbrio entre o líquido e os gases da atmosfera interna do reator, rica em CO₂ que se solubilizava formando ácido carbônico, que tamponava o sistema em pH sempre mais baixo que o inicial.

Observa-se, também, que o lixiviado utilizado como líquido de recirculação apresentava uma elevada capacidade tampão, pois o pH não chegou a valores inferiores a 7,0.

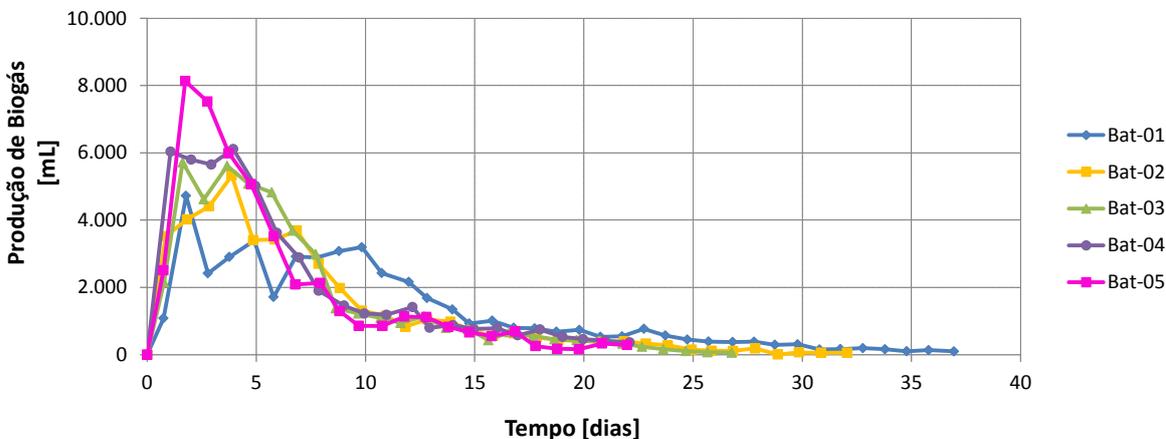
Figura 02 – Variação do pH ao longo do tempo no sistema (bateladas 01 a 05).



Por meio da Figura 03, faz-se possível a verificação da produção diária de biogás no sistema de reatores. Constata-se uma oscilação da geração diária nos primeiros dias das quatro primeiras bateladas, inclusive com algumas quedas acentuadas nas bateladas 01 e 03, possivelmente devido a uma ligeira queda de temperatura nos respectivos dias, como pode ser observado na Figura 01.

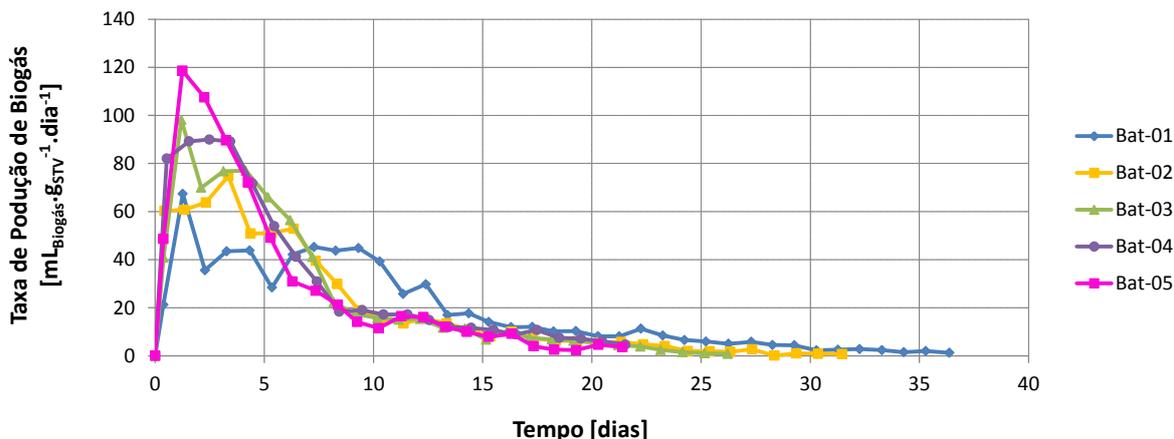
Observa-se na Figura 03 que a produção máxima de biogás vem crescendo batelada a batelada, sendo que a máxima produção diária foi registrada no segundo dia da batelada 05, sendo o valor máximo de 8,1 L/dia. Esse comportamento pode ser decorrente do aumento do número de micro-organismos que crescem no sistema anaeróbico com o tempo, e desta forma, ocorre um aumento na velocidade de biodegradação a cada batelada.

Figura 03 – Produção de biogás ao longo do tempo no sistema (bateladas 01 a 05).



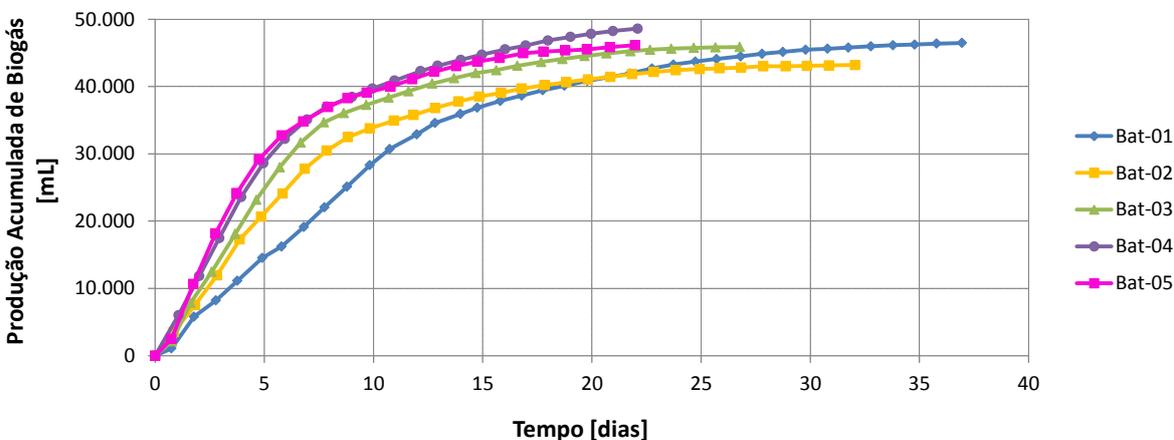
Convertendo a produção de biogás medida diariamente em taxa diária por grama de STV, obtém-se a Figura 04, que apresenta aspecto semelhante à anterior, entretanto corrige algumas diferenças relacionadas, por exemplo, à pequena diferença de massa inicial existente entre as amostras de resíduos. Nota-se por esta figura, que a máxima taxa de produção de biogás ficou em 118,6 mL_{Biogás}·g_{STV}⁻¹·dia⁻¹ na batelada 05, seguida por 98,2 mL_{Biogás}·g_{STV}⁻¹·dia⁻¹ na batelada 03 e 90,0 mL_{Biogás}·g_{STV}⁻¹·dia⁻¹ na batelada 04.

Figura 04 – Taxa de produção de biogás em relação à massa de STV (bateladas 01 a 05).



Com relação à produção acumulada de biogás, observa-se pela Figura 05 uma tendência praticamente linear no início. Nota-se uma produção de biogás mais relevante nos 15 primeiros dias, sendo que nos seguintes, o volume acrescido ao total gerado não foi tão relevante e justificou uma redução no tempo das bateladas, partindo-se de 37 dias na batelada 01 e chegando-se a 22 dias na 04. Desta forma, pode-se destacar duas fases distintas, uma em que houve a produção mais elevada de biogás, devido à digestão da parcela mais facilmente biodegradável do resíduo e outra fase lenta, por causa da metabolização de compostos complexos ou mesmo devido a uma possível inibição dos subprodutos da biodegradação (FERNÁNDEZ, PORRIER, CHAMY, 2001).

Figura 05 – Produção acumulada de biogás ao longo do tempo (bateladas 01 a 05).



Observa-se pela Figura 05 que o sistema está tendendo à estabilidade, o que pode ser notado pela quase sobreposição das curvas de produção acumulada de biogás das bateladas 04 e 05. Considerando-se a massa seca de resíduos (ST), o teor de sólidos totais voláteis (STV) e o teor de STV removido, são apresentados na Tabela 03 e na Tabela 04, respectivamente, a produção total de biogás e a de metano.

Tabela 03 – Volumes totais de biogás produzidos nas bateladas 01 a 04.

Batelada	Volume Total [mL _{Biogás}]	Metano [%]	Volume Específico [mL _{Biogás} ·g _{ST} ⁻¹]	Volume Específico [mL _{Biogás} ·g _{STV} ⁻¹]	Volume Específico [mL _{Biogás} ·g _{STV Remov} ⁻¹]
01	46.476	66,5	633,37	683,97	786,13
02	43.195	63,8	585,24	631,97	NA
03	45.874	64,9	623,35	669,89	742,90
04	48.611	62,3	656,87	709,31	NA
Média	46.039	64,4	624,71	673,78	764,51

OBS: Volumes obtidos à temperatura ambiente (25°C); NA = Ainda não analisado.

Tabela 04 – Volumes totais de metano produzidos nas bateladas 01 a 04.

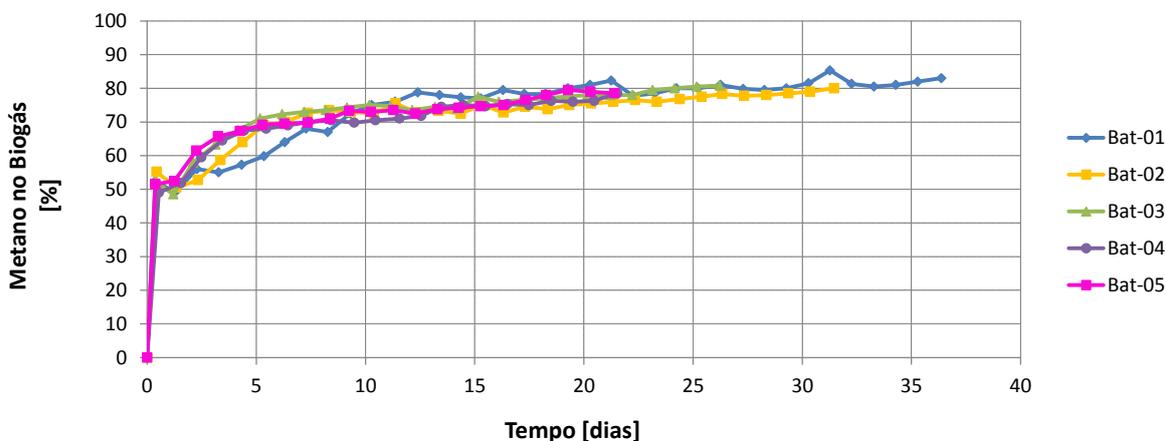
Batelada	Volume Total [mL _{Metano}]	Volume Específico [mL _{Metano} ·g _{ST} ⁻¹]	Volume Específico [mL _{Metano} ·g _{STV} ⁻¹]	Volume Específico [mL _{Metano} ·g _{STV Remov} ⁻¹]
01	30.921	421,39	455,05	523,02
02	27.561	373,42	403,23	NA
03	29.763	404,43	434,62	481,99
04	30.302	409,46	442,15	NA
Média	29.637	402,17	433,76	502,51

OBS: Volumes obtidos à temperatura ambiente (25°C); NA = Ainda não analisado.

A Figura 06 apresenta a variação do percentual de metano na composição do biogás ao longo do tempo de cada batelada. Observa-se por esta figura que desde o início das bateladas o biogás apresenta em sua composição aproximadamente 50% de metano, e esta porcentagem sempre cresce ao longo do tempo atingindo cerca de 70% logo ao quinto dia de operação e se aproximando de 80% ao final das bateladas. É provável que essa menor quantidade de metano no início das bateladas seja devido a uma maior geração de CO₂ que é produzido também nos processos de solubilização e hidrólise da matéria orgânica, que ocorrem em taxas mais elevadas no início de cada batelada e com o passar do tempo vão se reduzindo, fazendo com que a proporção de metano aumente no biogás.

Salienta-se que o resíduo inserido no digestor sempre foi previamente congelado em freezer, o que deveria fazer com que os micro-organismos ficassem inativos. Todavia, a solubilização e a acidificação ocorrem no sistema, e logo no primeiro dia já se verifica a produção de metano, assim, somente uma rápida colonização no resíduo por organismos existentes no inóculo justificaria este fato, que deverá ser verificado a posteriori com exames microbiológicos.

Figura 06 – Variação do percentual de metano no biogás ao longo do tempo (bateladas 01 a 05).



CONCLUSÕES

O uso de lixiviado de aterro sanitário do aterro de Paulínia como líquido de recirculação garantiu o tamponamento do sistema, evitando sua acidificação, uma vez que este apresentava alcalinidade elevada ($> 9.000 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$). Esta capacidade tampão manteve o pH sempre acima de 7,0 em todas as bateladas, o que favoreceu a metanogênese.

A produção de biogás observada foi em média $111,60 \text{ mL}_{\text{Biogás}} \cdot \text{g}_{\text{Resíduo}}^{-1}$, com teor de sólidos da ordem de 18%. Tomando-se por base o teor de STV e STV removido, as produções médias foram de $673,78 \text{ mL}_{\text{Biogás}} \cdot \text{g}_{\text{STV}}^{-1}$ e $764,51 \text{ mL}_{\text{Biogás}} \cdot \text{g}_{\text{STV Removido}}^{-1}$, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013** (2014).
2. APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21th Edition. Washington: American Public Health Association, 2005. 1368p..
3. BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Lei 12.305. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010.
4. FERNÁNDEZ, B.; PORRIER, P.; CHAMY, R. Effect of inoculum-substrate ratio on the start-up of solid waste anaerobic digesters. *Water Science and Technology – IWA*: 2001. Vol 44 No 4 pp 103–108..
5. LETTINGA ASSOCIATES FOUNDATION. **Development of decentralized anaerobic digestion systems for application in the UK. Phase 1 – Final report**. 2009.
6. IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos. Relatório de Pesquisa**. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Brasília, 2012.
7. NAIK, N.; TKACHENKO, E.; WUNG, R. **The Anaerobic Digestion of Organic Municipal Solid Waste in California**. Berkeley: University of California, 2013.