

III-266 - BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Francine Schulz⁽¹⁾

Bióloga, Mestre em Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Atualmente trabalha como técnica em química na Companhia Rio-grandense de Saneamento (CORSAN).

Luis Alcides Schiavo Miranda

Doutor em Ciências – Biotecnologia Ambiental.

Neuri Rempel

Mestre em Engenharia Civil.

Luciana Paulo Gomes

Doutora em Engenharia Civil.

Bruna Barcelos Serena

Graduanda em Engenharia Química.

Marcelo Oliveira Caetano

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

Endereço⁽¹⁾: Av. Eng. Irineu de Carvalho Braga, 98 A – Rio Branco – Canoas – RS - CEP: 92200-380 - Brasil
- Tel: +55 (51) 3466-8901 - e-mail: francine.schulz@gmail.com

RESUMO

O aproveitamento energético da fração orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) para geração de biogás é uma alternativa viável para minimizar os impactos sociais e ambientais causados pelo acúmulo e disposição destes resíduos nos aterros sanitários. A digestão anaeróbia, sob condições controladas, tem por objetivo maximizar o rendimento e a qualidade do biogás produzido. Dentre os parâmetros controlados o pH, a alcalinidade, a concentração dos ácidos graxos voláteis e a temperatura de operação são fundamentais para a otimização do processo. O objetivo do presente estudo foi determinar as condições operacionais adequadas para a obtenção do melhor rendimento na produção de biogás, utilizando como substrato a fração orgânica rejeitada pela operação da central de triagem do aterro sanitário do município de São Leopoldo - RS. O experimento foi executado em um reator anaeróbio de aço inox com volume de 50L, operado em batelada com mistura intermitente. Antes de cada batelada a fração orgânica de RSU foi triturada em um triturador mecânico. Foram realizadas 05 bateladas, utilizando diferentes taxas de carga orgânica e diferentes volumes de inóculo, buscando estabilizar o pH do sistema dentro da faixa ótima de processo e, também aumentar o volume de produção de biogás. Como resultado tem-se que a fração orgânica de RSU demonstrou possuir potencial de degradação e produção de biogás (mínimo de 6,71 e máximo de 22,45 m³ / ton RSU). Os teores de metano ficaram entre 70% e 80% ao final das bateladas, mesmo com pH ácidos (5,5-5,6). A dificuldade de homogeneizar adequadamente as amostras coletadas pode ter influenciado os resultados encontrados para os teores de COT. Os valores desta variável aumentaram ao longo do tempo, não coincidindo com os valores encontrados para os teores de SV, que diminuíram ao longo do tempo. Em todas as bateladas experimentais houveram dificuldades para manter o pH e a temperatura estáveis e dentro da faixa ótima de processo, o que levou a produção de biogás mais baixa do que a encontrada em outros estudos. As taxas de cargas orgânicas aplicadas, quando consideradas isoladamente como variável, não pareceram influenciar substancialmente no volume final de biogás produzido nas bateladas, mas sim na dificuldade de manutenção do pH na faixa ótima para digestão anaeróbia.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Digestão Anaeróbia, Resíduos Sólidos Urbanos, Biorreator.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico brasileiro, assim como na maioria dos países, conduziu ao crescimento e à concentração populacional urbana de forma desordenada. O modelo de crescimento econômico adotado pela maioria dos países leva ao uso dos recursos naturais de forma intensiva e indiscriminada.

Dessa forma, o desenvolvimento socioeconômico do Brasil não proporcionou o desenvolvimento social da população, e nem levou em consideração o equilíbrio ecológico e a capacidade suporte do meio ambiente. Como resultado, somos a 7ª economia mundial (CARNEIRO, 2013), e possuímos baixos índices sociais e diversos problemas ambientais. Entre eles, destaca-se a enorme quantidade de resíduos sólidos gerados, e que não possuem destinação adequada, indo parar em “lixões” ou em aterros controlados.

Segundo dados da ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) (2012), no Brasil são produzidos cerca de 201.000 t/dia de resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo que a fração orgânica representa aproximadamente 51,4% desse montante. Esta fração, além de utilizar um grande volume nos aterros sanitários, gera também lixiviado e emissões de gases estufa, como por exemplo, o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2).

Entre as diversas possibilidades de tratamentos dos RSU a digestão anaeróbia (DA) é uma alternativa a ser considerada para o tratamento da fração orgânica, pois gera produtos com valor econômico e energético. A biodegradação anaeróbia da matéria orgânica gera gases (CH_4 , CO_2) que podem ser captados e utilizados na produção de energia. Além disso, o resíduo do processo, um biocomposto estável, pode ser utilizado como fertilizante, uma vez que possui valores elevados de nutrientes como o nitrogênio (N) e o fósforo (P).

Esse processo (DA) ocorre naturalmente nos aterros sanitários, porém, sem um controle adequado quanto às proporções do volume de resíduos e à mistura com a fração inerte. Dessa forma, o gás produzido é perdido ou apenas queimado, sem ser aproveitado energeticamente. A simples captação do biogás com uma purificação primária, onde ocorre basicamente a remoção de gases sulfurados, já representa uma evolução do processo na busca pela sustentabilidade no modelo atual de destinação de RSU.

Para que se obtenha um melhor aproveitamento desse biogás, recomenda-se o uso de biorreatores que operem em condições controladas, permitindo uma maximização do processo. Alguns estudos em diferentes regiões do país têm utilizado resíduos da atividade agrícola, como dejetos de gado leiteiro e suínos, lodos de estação de tratamentos de esgoto ou mesmo resíduos orgânicos domiciliares para produzir biogás em digestores anaeróbios sob condições controladas, obtendo boa produtividade tanto em quantidade quanto em qualidade do biogás gerado.

O processo da DA é um processo bioquímico que ocorre na ausência de oxigênio molecular livre, onde diversas espécies de microrganismos convertem compostos orgânicos complexos em gases como CH_4 , CO_2 , nitrogênio (N_2), amônia (NH_3), ácido sulfídrico (H_2S) e traços de outros gases de baixo peso molecular (LEITE *et al.* 2009). As proporções destes compostos são variáveis, mas o CH_4 e o CO_2 apresentam as maiores concentrações. De acordo com Figueiredo (2011) o biogás pode conter de 40 a 80% de CH_4 , dependendo do tipo do resíduo, do tratamento empregado e da eficiência do processo adotado. Assim, fatores como a concentração do substrato, a temperatura, a umidade, o pH e a composição microbiana devem ser monitorados no sistema para maximizar a produção.

Neste contexto esta pesquisa tem como objetivo buscar uma alternativa para o uso da fração orgânica dos RSU do município de São Leopoldo, avaliando a produção de biogás a partir da biodegradação anaeróbia da fração orgânica de RSU, utilizando um biorreator com mistura intermitente e monitorando a temperatura do sistema. Como objetivos específicos têm-se: avaliar a produção de biogás a partir da fração biodegradável de RSU; identificar as principais condições operacionais de controle visando otimizar a geração de biogás; e estudar a influência da taxa de carga orgânica aplicada no processo.

METODOLOGIA

Sistema Experimental

O processo da digestão anaeróbia da fração orgânica de RSU foi operado em um reator anaeróbio em sistema de batelada com mistura intermitente. O reator foi confeccionado em aço inox 304 e possui o corpo cilíndrico e o fundo inclinado, contendo uma válvula do tipo borboleta para a retirada de biossólido para análise durante o processo. O volume total do reator é de 50L, porém, para o estudo foi utilizado um volume útil de aproximadamente 40L para que o biogás gerado pudesse circular e ser direcionado por uma mangueira de

silicone ao medidor do sistema. O sistema interno de mistura foi realizado com o auxílio de um motor acoplado a um motorreductor com controle de rotação.

A Figura 1 apresenta uma visão geral do sistema instalado no Anexo II do Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), localizada no município de São Leopoldo – RS.



Figura 1: Sistema Experimental da Digestão Anaeróbia.

Operação do biorreator

O TRS máximo utilizado foi de 34 dias e o mínimo de 25 dias, pois o estudo de Rempel (2014) sugeriu um TRS de aproximadamente 25 dias. A temperatura foi controlada pela recirculação de água quente na camisa do reator, no entanto, houveram variações acentuadas de batelada para batelada, atingindo um valor mínimo de 6°C no inverno e máximo de 40°C no verão. As bateladas realizadas nos meses de inverno tiveram maior variação da temperatura atingindo os valores mais baixos para essa variável (Bateladas 01 e 02), devido à falta de isolamento térmico do sistema utilizado no experimento.

A taxa de carga orgânica aplicada ficou na faixa de 168,25 e 307,50 kg RSU /m³, sendo os valores calculados sobre a massa de SV. A Tabela 5 traz as TCO utilizadas juntamente com o TRS e a relação Inóculo/RSU bruto utilizados em cada batelada. Buscou-se uma diminuição na TCO a fim de se verificar o desempenho da produção de biogás nas bateladas testadas.

Tabela 1: Dados operacionais de cada batelada do estudo.

Batelada	TRS (d)	NaOH 6N (L)	Volume de RSU (Kg)	Inóculo (%)	TCO (kg RSU/m ³)
01	34	3,05	15,0	30%	307,50
02	30	2,00	15,0	30%	291,00
03	25	2,00	11,0	50%	233,56
04	27	0	11,4	42%	215,25
05	26	1,40	8,0	52%	168,25

Sistema de agitação e controle de temperatura

Os resíduos foram misturados mecanicamente a 29 rpm a cada 2 horas. O sistema interno de mistura foi realizado com o auxílio de um motor acoplado a um motorreductor com controle de rotação. Um relé regulador controlou o tempo de mistura/repouso. O misturador é composto por um eixo vertical no qual estão dispostas um conjunto de três pás misturadoras inclinadas com ângulos diferentes, conforme pode ser observado na Figura 2 (c).

A forma de agitação utilizada nesta pesquisa, com intervalos de tempo breves e previamente definidos, com rotação lenta dos agitadores, baseou-se em recomendações do Guia Prático de Biogás (2010) e no trabalho de Rempel (2014).

Buscou-se manter a temperatura do sistema em $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$, com uso de um termostato em contato com o sistema interno e com auxílio de recirculação de água aquecida em um tanque externo, constantemente recirculada pela camisa do reator, conforme pode ser observado no sistema da Figura 1. A recirculação foi operada com o auxílio de uma bomba centrífuga, marca Schneider com vazão de $5,5\text{ m}^3/\text{h}$.

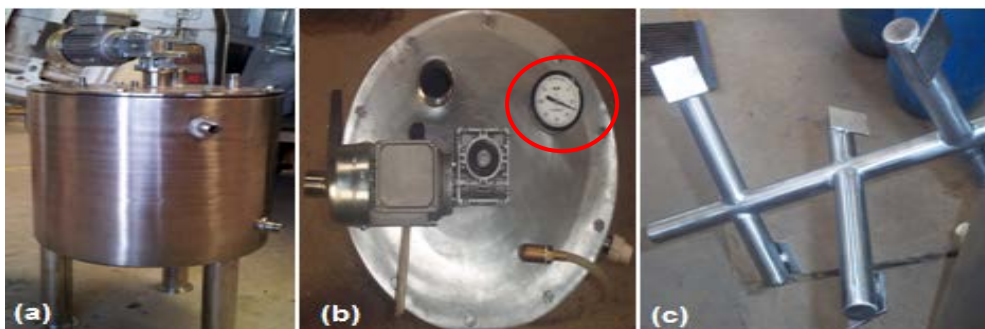


Figura 2: Digestor Anaeróbio
(a) Digestor; (b) Vista superior do digestor, com o termômetro em destaque; (c) Sistema de pás agitadoras do digestor (usadas internamente).

Inoculação

A inoculação do reator foi realizada com base em dados da literatura (CASTILLO *et al.*, 2006; CARNEIRO *et al.* 2008; FERNÁNDEZ *et al.* 2008; LEITE *et al.* 2009; REMPEL, 2014), onde verificam-se inoculações com percentuais de lodo anaeróbio entre 10 e 30% do volume útil do reator. Dessa forma, para a inoculação da primeira batelada adotou-se o uso de 30% de lodo anaeróbio com o objetivo de favorecer a agitação inicial do resíduo bruto. O lodo anaeróbio foi obtido de um reator UASB que trata esgoto doméstico da ETE Unisinos. A referida batelada não foi analisada, mas a DA não foi interrompida a fim de se preservar o material digerido para servir como inóculo para as bateladas seguintes. Nas demais bateladas, manteve-se uma quantidade de material digerido (lodo) no biorreator que serviu de inóculo para a batelada seguinte.

O percentual de inóculo utilizado em cada batelada foi definido com base no volume residual de sólidos deixado dentro do reator ao final de cada batelada. Para tanto se considerou a altura interna do digestor (45 cm). Portanto, ao final de cada batelada deixava-se dentro do reator uma altura de 13 a 26 cm de material digerido, o que equivaleu de 30% a 52% do volume do biorreator. Ao final de cada batelada o reator era aberto e uma fração do material digerido era retirada manualmente, deixando apenas o volume de inóculo previsto. Para a inoculação a tampa do digestor era removida para a adição do RSU bruto, conforme mostrado na Figura 3.



Figura 3: Abertura do sistema para retirada do material digerido em excesso.

As taxas de carga orgânica aplicadas foram calculadas com base na massa de SV presente nos inóculos e nos resíduos brutos triturados. Por isso, mesmo quando se utilizou a mesma quantidade de RSU e de inóculo (Bateladas 01 e 02) a TCO aplicada foi diferente, isso é esperado para este tipo de resíduo que possui variação natural de carga orgânica. A Figura 4 traz um fluxograma das etapas desse estudo, contendo a quantidade de RSU bruto, inóculo, TCO aplicada e relação RSU bruto/Inóculo utilizada em cada batelada.

Nas Bateladas 01, 02, 03 e 05 o pH foi ajustado no início do processo com NaOH 6N. Somente na Batelada 04 não houve adição de NaOH.

Coleta das amostras para análise

As amostras foram coletadas a partir de uma válvula do tipo borboleta, posicionada no fundo do digestor (ver Figura 1). Adaptou-se uma haste metálica que era introduzida no interior do digestor para a retirada das amostras, sem permitir a entrada de ar na base do reator.

Segundo o Guia Prático de Biogás (2010), devido à presença de bactérias anaeróbias facultativas, a entrada de oxigênio, desde que não seja em excesso, não ocasiona problema, pois o oxigênio é consumido pelas bactérias facultativas antes de causar danos às metanogênicas.

Substratos e insumos utilizados

O substrato orgânico utilizado na pesquisa foi coletado após a esteira de triagem do Aterro Sanitário do município de São Leopoldo. Os resíduos inertes foram separados manualmente e descartados, mas não foram analisados. Cabe ressaltar que se trata de um resíduo extremamente heterogêneo, e por isso, flutuações na carga orgânica natural do resíduo são esperadas.

A fração orgânica separada dos resíduos inertes foi triturada em um triturador mecânico do tipo TRAPP TR 200. Após a trituração do resíduo, em cada batelada, uma amostra era coletada para caracterização físico-química do substrato obtido. Para tanto, foram realizadas as análises de: teor de sólidos totais, fixos e voláteis, umidade, pH, alcalinidade, COT, Nitrogênio e Fósforo Total.

Nas bateladas com correção de pH, optou-se por corrigir o pH do meio com adição de NaOH 6N. Justifica-se o uso elevado da concentração para que se fosse utilizado o menor volume possível de solução.

A adição de NaOH ocorreu por meio de um tubo de PVC acoplado ao biodigestor (ver Figura 3), sem permitir a entrada de ar no sistema pelo controle da abertura da válvula do tubo.

Com a redução da TCO aplicada buscou-se utilizar um menor volume de NaOH, porém, apenas uma batelada (Batelada 04) não necessitou da adição desse insumo. A adição foi efetuada gradualmente, conforme os resultados de pH obtidos, procurando manter o pH dentro da faixa neutra.

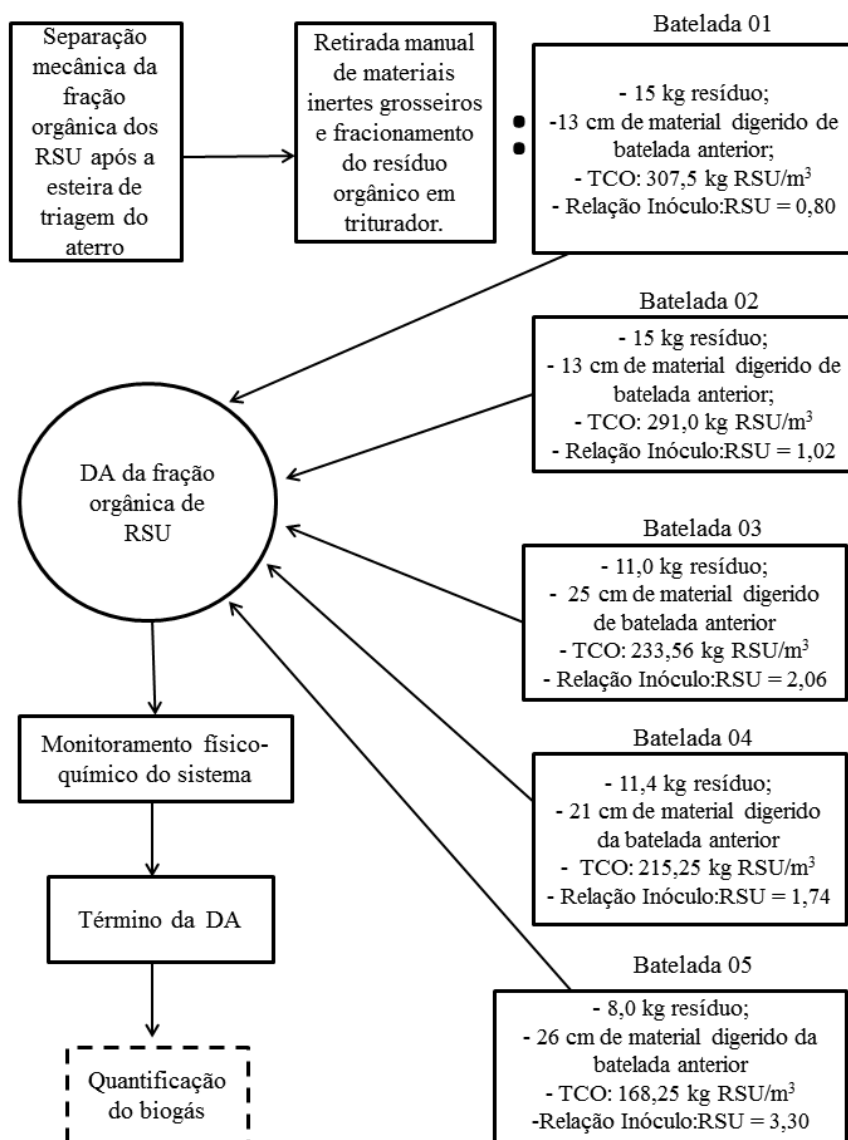


Figura 4: Fluxograma simplificado da digestão anaeróbia em cada batelada do estudo.

Monitoramento da vazão do biogás gerado

Para o monitoramento do volume de biogás foi usado um medidor do tipo Hyde, o qual mede o volume de biogás a partir do volume de água deslocada em uma câmara interna, controlado por um sensor infravermelho. A Figura 5 mostra uma imagem frontal do sistema de medição, o painel de marcação digital está destacado no quadrado vermelho.



Figura 5: Medidor de vazão do biogás gerado.

Cada pulso gerado no medidor foi multiplicado por 11,11, valor obtido pela calibração do equipamento, a qual foi realizada previamente utilizando-se uma bomba peristáltica, onde se mediu o deslocamento do volume de uma coluna d'água por pulso eletromagnético registrado no contador eletrônico. Desta calibração obteve-se o coeficiente acima, que representa o volume de biogás necessário para registrar um pulso no medidor. Desta forma cada pulso registrado no controlador eletrônico corresponde a 11,11 mL de biogás.

Determinação do teor de gases

Seguindo a metodologia proposta pelo Manual de Análise de Biogás da EMBRAPA (S/d) para as análises de NH_3 e H_2S utilizaram-se técnicas colorimétricas de comparação visual em cartelas e tabelas padrões. Estas análises foram adaptadas do método "Azul indofenol" para NH_3 e do método "Azul de metileno" para o H_2S . Já para as determinações de CO_2 e de CH_4 utilizou-se o método de Orsat com adaptações.

O Kit da EMBRAPA possui as seguintes faixas de leitura para cada parâmetro:

- Amônia: 15 – 1310 ppmV
- Gás sulfídrico: 610 – 3060 ppmV
- Gás Carbônico: 0 – 100%, com resolução de 2,5%.
- Metano: o percentual de metano é obtido pelo desconto do percentual de CO_2 .

Esse Kit é composto por uma série de seringas e soluções que devem ser aplicadas de acordo com o passo a passo contido no Manual. Trata-se de uma forma rápida e prática de análise para monitorar o sistema e a qualidade do biogás gerado (teor de CH_4 presente).

As seringas eram conectadas a uma mangueira de silicone acoplada ao digestor, que era aberta para circulação do biogás na hora da coleta para as análises dos teores de gases.

Monitoramento do sistema experimental

Os parâmetros monitorados no experimento seguiram metodologias conforme o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012) e Instrução Normativa Nº 28 de 2007 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), conforme apresentado no Quadro 1.

Os procedimentos analíticos de cada amostra foram realizados logo após a coleta, e quando este processo não foi possível, as amostras foram conservadas em câmara fria com temperatura inferior a 4°C.

O Quadro 1 apresenta os parâmetros analíticos, a frequência das análises e os métodos utilizados. Todas as análises foram realizadas em triplicata, exceto as medições do volume de biogás, teores de gases no biogás e temperatura, que tiveram um único registro.

Quadro 1: Parâmetros e frequência de análise do estudo.

PARÂMETROS	MÉTODO ANALÍTICO	FREQUÊNCIA			REFERÊNCIA
		Entrada do Digestor	No Digestor	Inóculo	
Sólidos Totais, Voláteis e Fixos (%)	Gravimétrico	A cada Alimentação	Três vezes/semana	Na Inoculação do Digestor	APHA (2012)
COT (%)	FR-NDIR ¹		Três vezes/semana		MAPA (2007)
NT (%) ²	Analítico, Multi N/C 2100S (analytikjena)		Semanal		MAPA (2007)
P _T (%)	Colorimétrico		-----		MAPA (2007)
pH	Potenciométrico		Três vezes/semana		APHA (2012)
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Titulométrico		Três vezes/semana		APHA (2012)
Acidez Total (mg CH ₃ -COOH./L)	Titulométrico		Três vezes/semana		APHA (2012)
Volume de Biogás	Medidor biogás do tipo Hyde	-----	Diariamente (Dias úteis)	-----	
Temperatura	Termômetro	-----	Diariamente (Dias úteis)	-----	
CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S e NH ₃ ³	Kit EMBRAPA	-----	Duas vezes/semana	-----	EMBRAPA

¹FR-NDIR: método de detecção de CO₂, formada pelo detector de infravermelho não dispersivo de radiação focalizada; ² As análises de NT foram realizadas somente até a segunda batelada, sendo interrompida devido a problemas no equipamento utilizado; ³ As análises de CH₄, CO₂, H₂S e NH₃ passaram a ser realizadas a partir da Batelada 03, com a aquisição do kit da EMBRAPA.

APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As cinco bateladas apresentadas anteriormente possuíam características diferentes de inoculação o que resultou na produção de diferentes volumes de biogás ao final do processo. Buscou-se reduzir a TCO aplicada a cada batelada a fim de verificar a influência dessa variável na produção de biogás. Os dados demonstram que a Batelada 01 apresentou a maior produção de biogás, porém, o seu TRS foi o maior e a quantidade de NaOH 6N utilizada para manter o pH próximo a 7,0 foi elevada (Tabela 2).

Tabela 2 – Características da inoculação de cada bateladada estudada e os valores obtidos para a produção acumulada de biogás ao final de cada uma delas.

	TRS (dias)	NaOH 6N (L)	RSU (Kg)	Inóculo (%)	TCO (kg RSU/m ³)	Relação Inóculo/RSU	Biogás (m ³ /ton RSU)	Biogás (L/ kg SV)
Batelada 01	34	3,05	15,0	30%	307,50	0,80	22,45	27,45
Batelada 02	30	2,00	15,0	30%	291,00	1,02	7,52	9,7
Batelada 03	25	2,00	11,0	50%	233,56	2,06	11,24	13,23
Batelada 04	27	0	11,4	42%	215,25	1,74	6,71	8,88
Batelada 05	26*	1,40	8,0	52%	168,25	3,30	10,64	12,65

*Os onze primeiros dias ficaram sem a marcação do medidor de biogás.

Tomando-se os 15 primeiros dias de medição da produção de biogás (tempo mínimo marcado experimentalmente) observa-se que a Batelada 05 teve o melhor desempenho (Tabela 3), no entanto, a marcação da produção de biogás iniciou apenas após o 11º dia de inoculação, fato que impede uma comparação efetiva dos resultados.

Tabela 3 – Comparação entre as bateladas considerando os 15 primeiros dias de medição.

	RSU (Kg)	Inóculo (%)	TCO (kg RSU/m ³)	Relação Inóculo/RSU	Biogás (m ³ / ton RSU)	Biogás (L/ kg SV)
Batelada 01	15,0	30%	307,50	0,80	5,67	6,91
Batelada 02	15,0	30%	291,00	1,02	1,84	2,37
Batelada 03	11,0	50%	233,56	2,06	8,32	9,80
Batelada 04	11,4	42%	215,25	1,74	5,33	7,06
Batelada 05*	8,0	52%	168,25	3,30	10,64	12,65

*A marcação da produção de biogás iniciou após o 11º dia de inoculação.

Excluindo-se a Batelada 05, devido à perda da marcação da produção de biogás nos 11 primeiros dias após a inoculação, e considerando a produção de biogás medido durante 21 dias, observa-se que a Batelada 03 apresentou o melhor desempenho dentro das condições testadas. Esta batelada utilizou uma menor TCO aplicada e uma maior relação Inóculo/RSU quando comparada a Batelada 01, que obteve o segundo melhor desempenho (Tabela 4).

Tabela 4 – Comparação entre as bateladas, considerando a produção acumulada de biogás em 15 dias.

	RSU (Kg)	Inóculo (%)	TCO (kg RSU/m ³)	Relação Inóculo/RSU	Biogás (m ³ / ton RSU)	Biogás (L/ kg SV)
Batelada 01	15,0	30%	307,50	0,80	5,67	6,91
Batelada 02	15,0	30%	291,00	1,02	1,00	1,29
Batelada 03	11,0	50%	233,56	2,06	8,12	9,56
Batelada 04	11,4	42%	215,25	1,74	4,01	5,31

As alterações nas formas de inoculação e as características diferentes dos substratos e dos inóculos, utilizados em cada batelada, resultaram em valores distintos para os parâmetros analisados por este estudo. A Tabela 5 apresenta as características obtidas nas amostras coletadas ao final de cada uma das cinco bateladas apresentadas.

Tabela 5 – Resultados obtidos para o RSU bruto e ao final de cada batelada para os parâmetros analíticos efetuados neste estudo.

		Análisis de Calidad de este Estado:													
Batelada		ST ¹	SV ¹	SF ¹	NT ¹	COT ₁	C/N	Temp ₂	pH	Alcalidade ₃	Acidez ₄	CO ₂ ₁	CH ₄ ₁	NH ₃ ₆	H ₂ S ⁶
01	Bruto	22,9	82,0	18,0	1,37	23,3	17	-	5,1	570	726	-	-	-	-
	Final	20,2	61,0	39,0	-	26,5	-	23	7,5	2686	2318	-	-	-	-
02	Bruto	29,0	77,6	22,4	0,23	21,7	94	-	5,8	239	748	-	-	-	-
	Final	22,3	54,3	45,7	0,4	22,8	57	20	5,6	1030	1335	-	-	-	-
03	Bruto	24,9	84,1	15,9	-	15,6	-	-	4,8	241	588	-	-	-	-
	Final	19,8	60,1	39,9	-	17,0	-	30	5,5	1688	2580	30	70	0	< 20
04	Bruto	33,6	84,9	15,1	-	15,0	-	-	5,8	410	588	-	-	-	-
	Final	23,6	57,5	42,5	-	15,7	-	30	5,5	1240	2436	30	70	0	< 20
05	Bruto	31,6	75,5	24,5	-	17,0	-	-	4,2	0	1536	-	-	-	-
	Final	19,4	61,5	38,5	-	18,0	-	25	6,8	2514	2496	20	80	0	< 20

1 – Valores em percentual (%); 2 – Valores em Graus Celsius (°C) para a média de temperatura obtida; 3 – Valores em mg CaCO₃/L; 4 – Valores em mg CH₃-COOH/L; 5 – Valores em mg/L; 6 – Valores em ppm.

O teor de sólidos para a partida do reator (ST dos resíduos brutos) das bateladas apresentou-se na faixa indicada por BOUALLAGUI *et al.* (2004), 60 a 80% de umidade (20 a 40% ST), para se atingir uma maior taxa de produção de metano. Os valores obtidos para os teores de ST de todas as bateladas ao final da digestão, também se mantiveram dentro ou próximo dessa faixa (Mínimo = 19,4%; Máximo = 23,6%).

Nota-se que a maioria dos valores finais de pH não apresentaram-se dentro da faixa ideal para a DA proposta por Riuji (2009) (6,0 – 8,0). Porém, em três das cinco bateladas houve correlação positiva entre o pH e a produção de biogás obtida. Os melhores resultados para esta variável foram apresentados pelas Bateladas 01 (que utilizou elevada quantidade de NaOH) e 04 (que não teve adição de NaOH). No entanto, Silva (2009) tratando resíduos sólidos vegetais obteve o pH médio do sistema oscilando entre 5,25 e 5,76, segundo o autor, os baixos valores de pH não contribuíram para a inibição do processo metanogênico, pois houve produção de CH₄ no sistema. Este fato também foi observado nas Bateladas 03 e 05 com produção de metano medida em pH 5,5.

Segundo Aquino *et al.* (2005) é importante salientar que em um reator estável, operado sob condições ótimas de crescimento microbiano, e na ausência de fatores de estresse, as etapas acidogênica, acetogênica e metanogênica ocorrerão em passos similares, de forma a haver uma equalização nas taxas de produção e consumo dos compostos intermediários. Nesses casos não haverá acumulação significativa de ácidos graxos voláteis (AGV) e o processo operará próximo às condições de equilíbrio dinâmico. Entretanto, em função das variações na composição do RSU essa condição é raramente observada, e dificuldades na manutenção das condições ambientais, como a temperatura, e o acúmulo de AGV, levam a desequilíbrios no sistema.

Embora não tenham sido realizadas análises de AGV durante as bateladas, é possível prever que o acúmulo destes gases no sistema foi o responsável pela dificuldade na obtenção de um pH adequado. Este acúmulo deve ser entendido como uma condição instável, e, provavelmente foi gerado em função das elevadas cargas orgânicas aplicadas, o que não refletiu deficiência do processo. Podemos, com base nos dados de acompanhamento das bateladas, inferir que uma ou mais etapas do consórcio anaeróbio acabou sendo prejudicado.

Com exceção da Batelada 02, todas as demais apresentaram valores acima de 2000 mg CH₃-COOH/L para acidez o que reflete as características ácidas do resíduo bruto utilizado. Os valores encontrados para alcalinidade também foram elevados, acima de 1000 mg CaCO₃/L, fato que pode ser explicado pela adição do NaOH 6N, com exceção da Batelada 04 em que não houve adição deste insumo. LEITE *et al.* (2004) afirmam que para resíduos com pH em torno de 5,0, a alcalinidade total é constituída basicamente por sais derivados de ácidos graxos voláteis. Em seu trabalho, tratando esgoto sanitário, a alcalinidade total do substrato variou de 1,8 a 5,0 g CaCO₃/L. Já no material efluente a alcalinidade total variou de 3,8 a 4,8 g CaCO₃/L, não tendo sido

constatado um acréscimo constante da alcalinidade total em função do tempo de operação (LEITE *et al.*, 2004). Comparado a estes valores, os valores alcançados para alcalinidade neste estudo foram mais baixos.

A relação entre a acidez total e a alcalinidade não deve ser superior a 0,4 para processos de tratamento anaeróbio, a fim de se favorecer o estado de equilíbrio dinâmico no reator e para que o biogás produzido possa conter em média 60% (percentagem em volume) de CH₄ (Astals *et al.*, 2012; LEITE *et al.*, 2004). No presente estudo essa relação foi muito superior no desenvolvimento das bateladas, sendo próxima ou superior a 1,0. Este fato também ocorreu nas bateladas desenvolvidas por Rempel (2014) com a fração orgânica de RSU. O mesmo autor retrata que isto não influenciou no rendimento do biogás gerado.

Em todas as bateladas pode se observar a redução do teor de ST (Batelada 01, mínimo encontrado = 2,7%; Batelada 04, máximo encontrado = 12,2%) e de SV (Batelada 04, mínimo encontrado = 14,0%; Batelada 03, máximo encontrado = 27,4%) o que remete a degradação da matéria orgânica ocorrida no processo da DA. Outros estudos também encontraram redução nos SV. Rempel (2014) encontrou uma redução mínima de 6,4% e uma redução máxima de 27,5% de SV para a fração orgânica de RSU, enquanto Leite *et al.* (2004) uma redução média de 80%. Segundo esses últimos autores, a eficiência de redução de SV estimada foi associada à fração retida no interior do reator e à fração convertida em biogás. Estimou-se que da fração de SV retida no interior do reator, cerca de 75% do material predominantemente orgânico e mais solúvel estavam sendo bioestabilizados, convertendo-se em biogás durante o período de retenção de sólidos, que no trabalho realizado foi de 90 dias (LEITE *et al.*, 2004). A redução de SV no presente estudo foi inferior ao encontrado nos estudos citados, porém, o TRS utilizado também foi inferior.

Houve um aumento discreto do teor de COT em todas as bateladas. Cabe ressaltar que a variação entre os valores finais e iniciais no teor de COT foram pouco significativas, sendo o valor máximo encontrado de 3,2% a mais (Batelada 01). Estes aumentos discretos e a pouca variação geral nos teores de COT podem estar relacionados à presença de erros analíticos, e também, com a dificuldade de homogeneizar este tipo de amostra para a realização da análise.

De acordo com Leite *et al.* (2004) a eficiência da transformação de material carbonáceo ocorre em função das características físicas e químicas do substrato, da carga orgânica aplicada e do tempo de retenção de sólidos no interior do reator. Rempel (2014) encontrou redução significativa na concentração de COT apenas em uma das suas bateladas. O autor afirma que este fato pode ter sido relacionado à adição de glicerina (fonte externa de carbono) ou ainda ao fato de que no balanço geral de carbono consumido no sistema, a quantidade de carbono removido para a produção de biogás seja inferior ao carbono utilizado para o crescimento bacteriano (REMPEL, 2014). O mesmo autor também relatou redução dos teores de SV ao final das bateladas, mesmo com o aumento dos teores de COT (REMPEL, 2014), como ocorreu neste estudo, não mostrando uma correlação da redução destas duas variáveis (SV e COT) ao longo do tempo estudado.

Os teores de CH₄, CO₂, NH₃ e H₂S encontrados neste estudo condizem com o citado pela literatura. SOUZA *et al.* (2010) afirmam que a composição básica do biogás é de CH₄ (60 - 80%), CO₂ (20 - 40%) e concentrações menores de H₂S, N₂ e H₂.

Os valores obtidos para a produção de biogás neste estudo foram muito inferiores aos obtidos por outros estudos com a fração orgânica de RSU. As tecnologias alemãs utilizadas em escala real preveem um rendimento de 80 a 200 m³ de biogás por tonelada de RSU alimentada (GUIA PRÁTICO DE BIOGÁS, 2010). Porém, essa alimentação geralmente ocorre de forma contínua. O trabalho de Rempel (2014) obteve um rendimento médio de 44 m³ de biogás / ton RSU. No entanto, o TRS utilizado foi maior, houve um controle mais rigoroso do pH (mantido em torno de 7,0), e houve, ainda, a adição de glicerina como cosubstrato em algumas das bateladas.

Em experimentos de bancada realizados em condições termofílicas, Forster-Carneiro *et al.* (2008) encontraram uma produção de 530L de CH₄/ kg de SV, utilizando com substrato restos de comida; Vogt *et al.* (2002) obtiveram 360L de CH₄/ kg de SV tratando RSU por tecnologia canadense SUBBOR (em inglês *Super Blue Box Recycling*), que utiliza um reator de dois estágios; e Walker *et al.* (2009) uma produção de 200 L de CH₄/ kg de SV, utilizando resíduo domiciliar com tratamento sequencial aeróbico-anaeróbico-aeróbico. Esses resultados também foram superiores aos desse estudo, porém, as condições encontradas em experimentos de bancada dificilmente são reproduzidas em escalas maiores e, por tanto, mais próximas de uma escala real.

Dois fatores importantes podem ter afetado o rendimento das bateladas realizadas neste estudo foram o pH, que ficou abaixo do ideal em três bateladas, e, a oscilação da temperatura em todas as bateladas, especialmente nas primeiras, que foram realizadas nos meses de inverno. CECCHI *et al.* (1992), tratando RSU, encontraram uma maior produção de biogás durante os meses de verão, com temperaturas mais elevadas e menos variáveis.

CONCLUSÕES

- A fração orgânica de RSU do município de São Leopoldo demonstrou possuir potencial de degradação pela digestão anaeróbia, produzindo volumes variáveis de biogás (mínimo de 6,71 e máximo de 22,45 m³/ton de RSU);
- O controle não efetivo da temperatura do sistema prejudicou o volume de biogás produzido nas bateladas;
- O pH do sistema deve ser mantido em uma faixa neutra e estável para que se obtenha um melhor rendimento na produção de biogás;
- As taxas de carga orgânica aplicadas e o volume de inóculo não foram adequados para manter o pH do sistema perto da neutralidade em quase todas as bateladas;
- A Batelada 03, com a segunda menor taxa de aplicação de carga orgânica, foi a única que não necessitou de adição de NaOH para manter o pH próximo da neutralidade;
- As taxas de carga orgânica aplicadas, quando consideradas isoladamente como variável, não pareceram influenciar substancialmente no volume final de biogás produzido nas bateladas, mas sim na dificuldade de manutenção do pH na faixa ótima para digestão anaeróbia;
- Foi observado a presença de metano entre 70% e 80% no biogás, mesmo com pH fora da faixa neutra (5,5-5,6) ao final das Bateladas 04 e 05;
- A produção de biogás por tonelada de resíduo ficou abaixo do relatado na literatura, provavelmente devido a dificuldades de controle do pH e temperatura durante cada batelada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. 116p. 2012.
2. ASTALS, S.; NOLLA-ARDÈVOL, V.; MATA-ALVAREZ, J. Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate. *Bioresource Technology*, v.110, p. 63–70, 2012.
3. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22 nd ed., Washington, American Public Health Association Pub., 1935 p.
4. AQUINO, S.F.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo De Ácidos Graxos Voláteis (AGVs) Em Reatores Anaeróbios Sob Estresse: Causas e Estratégias de Controle. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.10, p.152-161, 2005.
5. BOUALLAGUI, H.; CHEIKH, R.B.; MAROUANI, L.; HAMDI, M.; HAOUARI, O.; TOUHAMI, Y. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. *Process Biochemistry*, v.39, p.2143–2148, 2004.
6. BRASIL. Instrução Normativa nº 27 de 30 de agosto de 2012. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).
7. CARNEIRO, L. 2013. As fraquezas da 7ª economia mundial. *Jornal “O Globo”*. <<http://oglobo.globo.com/economia/as-fraquezas-da-7-economia-mundial-10085118>>. Acesso em: Novembro de 2013.
8. CECCHI, F.; MATA-ALVAREZ, J.; PAVAN, P.; VALLINI, G.; DE POLIS, F. Seasonal effects on anaerobic digestion of the sorted organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management & Research*, v. 10, p. 435-443, 1992.

9. EMPRESA BRASILEIRA DE PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - EMBRAPA. Manual de Análise – BIOGÁS. Orgs: KUNZ, A.; OLIVEIRA, L.; PICCININ, L. S. s/d.
10. FIGUEIREDO, N. J. V. Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – estudo de caso. 2011. 148f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2011.
11. FOSTER-CARNEIRO, T.F.; PÉREZ, M.; ROMERO, L.I. Influence of total solid and inoculums contents on performance of anaerobic reactors treating food waste. *Bioresource Technology*, v. 99, p.6994–7002, 2008.
12. GUIA PRÁTICO DE BIOGÁS - Geração e Utilização (versão original: 2010). Disponível em: <www.cidades.gov.br/probiogas>. Acesso em: Abril de 2014.
13. LEITE, V.D.; LOPES, W.S.; SOUSA, J.T.; PRASAD, S.; SILVA, S.A. Tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 9, p.280-284, 2004.
14. LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUZA, J. T.; PRASAD, S.; SILVA, S. A. Tratamento anaeróbio de resíduo sólido orgânico com alta e baixa concentração de sólidos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.2, p. 190-196, 2009.
15. REMPEL, N. Biodigestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos consorciado com glicerina. 2014. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS. 2013.
16. RIUJI, L. C. Research on anaerobic digestion of organic solid waste at household level in Dar Es Salaam, Tanzania. 2009. 63f. Bachelorthesis. Institute of Natural Resource Sciences, Zurich University, Suíça. 2009.
17. SILVA, W. R. Estudo Cinético do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Vegetais. 2009. 175f. Tese (Doutorado em Química Analítica). Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. 2009.
18. SOUZA, O.; FEDERIZZI, M.; COELHO, B.; WAGNER, T.M.; WISBECK, E. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.14, n.4, p.438-443, 2010.
19. WALKER, L.R.; RUWISCH, R.C.; SCIBERRAS, S. Performance of a commercial-scale dicom™ demonstration facility treating mixed municipal solid waste. In. *International conference on Solid Waste Moving Towards Sustainable Resource Management*, 2011.
20. VOGT, G.M., LIU, H.W., KENNEDY, K.J., VOGT, H.S., HOLBEIN, B.E. Super blue box recycling (SUBBOR) enhanced two-stage anaerobic digestion process for recycling municipal solid waste: laboratory pilot studies. *Bioresource Technology*, v. 85, 291–299, 2002.