

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

POTENCIALIDADE ENERGÉTICA E QUALIDADE DO BIOFERTILIZANTE PRODUZIDO EM BIODIGESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PUTRESCÍVEIS DE RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO

*Luciana Paulo Gomes¹
Douglas Velho²
Roger Pieri²
Marcelo Oliveira Caetano¹
Luís Alcides Schiavo Miranda¹

ENERGY CAPABILITY AND QUALITY OF BIO- FERTILIZERS PRODUCED IN THE BIODIGESTION OF PUTRESCIBLE SOLID WASTE FROM A UNIVERSITY RESTAURANT

Recibido el 23 de febrero de 2017; Aceptado el 22 de febrero de 2018

Abstract

The accumulation of solid waste produced by society represents today one of the main environmental impacts encountered. They are usually arranged in landfills that, if not operated almost like dumps, are systems that don't take advantage of the biogas generated. The present work conducted the assessment of biogas and bio-fertilizers produced from a biodigester which operates in batch. Five tests were conducted, under mesophilic conditions, where the biodigester was fed with the readily biodegradable organic fraction of solid waste produced in a university restaurant. During the tests, the average organic loading rate was 30.4 ± 15.1 g VTS/day.m³. The biofertilizer produced presented pH between 7.9 and 8.6. The total organic carbon was 13.4% and average total nitrogen in 0.24%, i.e. average ratio of 58:1. The proportion that presented the best results was 2:1 (batch 5), with production of 2.416.12 NL of biogas. The biogas generated presented average content of methane of 77.8%, being estimated, in case of use of biogas in the digester's own operation, a positive energy balance of 1.21 kWh.

Keywords: biofertilizers, biogas, solid waste, anaerobic digestion, biodigester.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.

² Laboratório de Saneamento Ambiental, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.

*Autor correspondiente: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Av. Unisinos, 950, Cristo Rei, São Leopoldo - RS - Brasil, Caixa Postal 275, CEP 93022-000. Email: lugomes@unisinos.br

Resumo

O acúmulo de resíduos sólidos urbanos produzidos pela sociedade representa hoje um dos principais impactos ambientais enfrentados. Geralmente são dispostos em aterros que, se não são operados quase como lixões, são sistemas que não aproveitam o biogás gerado. O presente trabalho realizou a avaliação do biogás e do biofertilizante produzidos a partir de um biodigestor anaeróbio, operado em batelada. Foram realizados cinco ensaios, em condições mesofílicas, quando o biodigestor foi alimentado com a fração orgânica facilmente biodegradável dos resíduos sólidos produzidos em um restaurante universitário. Durante os ensaios a taxa de carregamento orgânico média foi de 30.4 ± 15.1 g STV/dia.m³. O biofertilizante produzido apresentou pH entre 7.9 e 8.6. O carbono orgânico total resultou em 13.4% e nitrogênio total médio em 0.24 %, ou seja, relação média de 58:1. A proporção que apresentou melhores resultados foi a 2:1 (batelada 5), com produção de 2416.12 NL de biogás. O biogás gerado apresentou teor médio de metano igual a 77.8%, sendo que se estimou, para o caso de uso deste biogás na operação do próprio biodigestor anaeróbio, um balanço energético positivo igual a 1.21 kWh.

Palavras chave: biofertilizantes, biogás, resíduos sólidos, digestão anaeróbia, biodigestor anaeróbio.

Introdução

Estima-se que do total da massa coletada de resíduos sólidos urbanos no Brasil, cerca de 62.5 milhões de toneladas: 60.9%, é disposta em aterros sanitários, 11.5% em aterros controlados, 10.1% em lixões, 15,4% não possui informação de destinação e apenas 2.1% é encaminhada para uma das 846 unidades de triagem ou das 103 unidades de compostagem cadastradas no país (SNIS, 2015). A gravimetria média do país aponta ainda que a fração orgânica facilmente biodegradável representa mais de 50% da massa de resíduos coletados, portanto um quantitativo em torno de 30 milhões de toneladas, cujo potencial não é, normalmente, aproveitado.

Neste contexto, a utilização da digestão anaeróbia surge como uma alternativa promissora. O processo gera os seguintes produtos: o biofertilizante para estabilização de solos e o biogás (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Silvia & Pelícia, 2012).

Em relação ao biofertilizante oriundo da parte orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU), conforme Brasil (2006), estes podem ser classificados como Classe C. Assim para este caso, segundo a Instrução Normativa nº 27, os limites para a presença de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos devem ser 1000 NMP/g de matéria seca e 1.0 ovo viável/4g, respectivamente. Já o biogás, proveniente da fermentação da biomassa, tem um significativo potencial energético (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Silvia & Pelícia, 2012). Em termos de qualidade deste biogás, as características usuais são: 55% de metano, 38% de dióxido de carbono, 5% de água, 1% de oxigênio e o restante de uma mistura de outros gases como nitrogênio, gás sulfídrico e amônia (German Biogas Association, 2015).

Existem inúmeras pesquisas que estimam as taxas de geração de biogás a partir da digestão anaeróbia de RSU (frutas, vegetais, restos de alimentos misturados, etc.). Reichert (2005),

apresenta resultados de diferentes tecnologias de digestão anaeróbia, os quais indicam produção de biogás na faixa de 80 a 200 Nm³/t RSU. Já, Walker *et al.* (2011) e Forster-Carneiro *et al.* (2008), relatam taxas variando entre 200 L/kg STV (para RSU) e 850 L/kg STV (para frutas e vegetais).

Apesar deste potencial energético, o Brasil possui apenas 15 aterros sanitários que utilizam o biogás para produção de energia elétrica. Para estes casos, a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica Brasileira, informa uma capacidade total instalada de 113,246 kW. Isto representa apenas 0.81% do total de biomassa ou 0.08% da capacidade total nacional. No banco de dados da ANEEL, não há nenhum registro de biodigestor anaeróbio (ANEEL, 2016).

Este estudo tem como objetivo analisar a melhor proporção de inóculo e resíduos sólidos putrescíveis, provenientes do preparo e pós-consumo das refeições servidas no restaurante universitário, para a geração de biogás e analisar a sua potencialidade energética e ainda a qualidade do biofertilizante produzido.

Materiais e métodos

Descrição do processo

Para a realização da pesquisa experimental, o processo de digestão anaeróbia foi operado por batelada em um reator confeccionado em aço carbono com capacidade de 282 litros e volume útil de 254 litros (Figura 1).

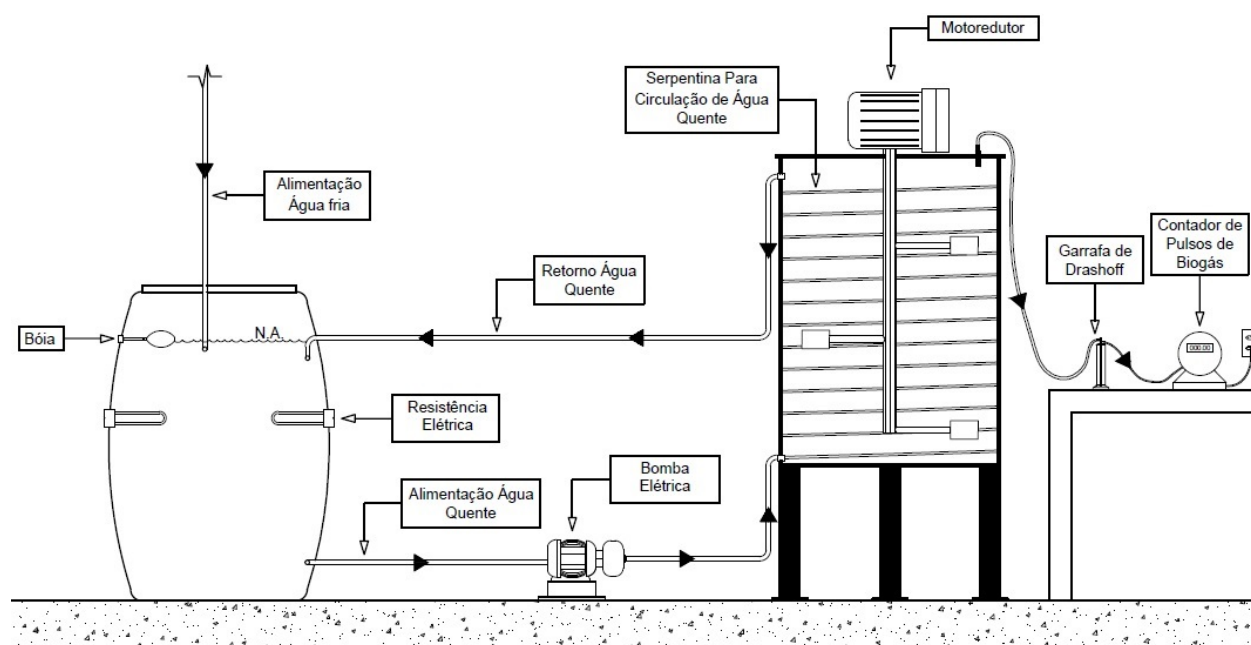


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de biodigestão

O biodigestor anaeróbico possui uma abertura superior para alimentação; duas saídas superiores de gás; duas saídas laterais utilizadas como ponto de coleta de amostra; um extravasor com válvula para descarga do material digerido; um sistema de aquecimento via serpentina metálica com circulação de água; e, um sistema de mistura composto por um eixo vertical central acoplado a um moto-reductor. A temperatura interna no sistema foi controlada pela recirculação de água quente em uma serpentina metálica instalada dentro do corpo do reator, a qual fica em contato direto com o material digerido.

A água foi aquecida por meio de resistência elétrica e foi armazenada dentro de um tambor plástico com capacidade para 200 litros, tendo como objetivo manter a temperatura interna do reator em 35°C. A circulação da água foi realizada com o auxílio de uma bomba centrífuga da marca Schneider com vazão de 5.5 m³/h.

A mistura interna dos resíduos foi realizada mecanicamente com o auxílio de pás metálicas instaladas no eixo vertical central acoplado a um motor externo equipado com moto-reductor e controle de rotação a partir de um relé regulador. Trabalhou-se com misturas de 30 minutos a cada 2 horas, continuamente até o final da batelada.

Materiais utilizados

Foram estudadas cinco bateladas (B) com alimentação de resíduos sólidos putrescíveis (RSP) e inóculo. A alimentação na primeira batelada foi executada com lodo (LO) proveniente de reator UASB. Este lodo foi considerado o inóculo inicial. Nas demais bateladas foi utilizado o biofertilizante gerado na batelada anterior como inóculo (IN). Considerou-se este inóculo como forma de acelerar o processo, visto que, a utilização do inóculo já ambientado ao meio diminui o tempo de estabilização dos resíduos sólidos putrescíveis.

O lodo anaeróbico utilizado foi oriundo do fundo do reator Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) da Unisinos. Os resíduos sólidos putrescíveis foram coletados no restaurante universitário da mesma universidade. Foram considerados apenas restos de alimentos, provenientes do preparo e pós consumo das refeições servidas no restaurante. A caracterização do lodo e do substrato foram feitas com relação ao teor de sólidos totais, fixos e voláteis, pH, alcalinidade e acidez.

As proporções de RSP, LO e IN foram calculadas em relação aos resultados dos sólidos totais voláteis (STV) de cada amostra. O intuito foi obter a melhor relação de RSP que permita a operação com pH estável na faixa neutra e, conseqüente, ativação do sistema, objetivando maior produção de biogás com alto teor de metano.

Métodos analíticos

A determinação dos teores de Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e Sólidos Totais Fixos (STF) foi realizada de acordo com o Standard Methods for Examination of Water and Wastewater – métodos 2540B e 2540E (Apha, 2012).

Ao final de cada batelada o biofertilizante produzido foi avaliado química e microbiologicamente, conforme a seguir detalhado. Estas avaliações seguiram as determinações da Instrução Normativa nº 25 do MAPA (Brasil, 2009) e Instrução Normativa nº27 (Brasil, 2006).

Para acompanhamento químico do processo foram retiradas amostras do biodigestor para AGV e alcalinidade (método: Dilallo e Albertson (1961), 2 x semana), pH (Apha (2012), método 4500, 2 x semana), COT (Apha (2012), método 5310-D e Mapa (2014), 3 x semana), NT (Apha (2012), método 4500C-N, semanal), NO (Apha (2012), método 4500B-Norg , semanal) PT (Mapa (2014), semanal), ST, STV e STF (Apha (2012), método 2540B e E, 3 x semana), DBO (Apha (2012), método 5210D, semanal), DQO (Apha (2012), método 5220D, semanal).

A maturidade do biofertilizante foi avaliada via teste de germinação utilizando alface (*Lactuca sativa*). Para a realização deste teste foi utilizado o extrato aquoso extraído a partir do biofertilizante produzido na biodigestão. A obtenção do extrato e repetições seguiram a metodologia sugerida por Silva e Villas Bôas (2007). Foram realizadas quatro repetições utilizando 25 sementes, que foram escolhidas de forma aleatória e distribuídas em placas de Petri, usando papel filtro como substrato, umedecidas com 6 mL do extrato e um experimento com placas irrigadas apenas com água destilada. Como controle, utilizou-se água destilada. Para análise da germinação foram considerados os parâmetros PG (Porcentagem de Germinação) e IVG (Índice de Velocidade de Germinação).

Por fim, para a avaliação microbiológica, utilizou-se a determinação de ovos de helmintos, através do Método de Bailenger, modificado por Ayres & Mara (1996). E, para coliformes termotolerantes, o método seguiu o Standard Methods for Examination of Water and Wastewater – método 9223 (APHA, 2012).

Para determinação do teor de metano no biogás gerado no biodigestor anaeróbio, utilizou-se kit de análise de biogás da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). A determinação do volume de biogás foi realizada com medidor do tipo Hyde modelo HM-02, o qual mede o volume de biogás a partir do volume de água deslocada em uma câmara interna e controlado por sensor infravermelho. E, para o acompanhamento da temperatura do biogás utilizou-se um termohigrômetro. Os resultados foram corrigidos conforme as condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

A partir da geração de biogás foram feitas relações como: taxa de biogás por dia, volume de biogás por quilograma de STV adicionado, volume total de metano e volume total de metano por quilograma de STV adicionado. A taxa de geração de biogás representa a relação entre o volume de biogás ao longo dos dias decorridos no experimento.

Os parâmetros utilizados para os dimensionamentos da produção teórica de biogás foram: massa de STV adicionada (em kg); massa de RSP adicionada (em kg); volumen de biogás (NL); Taxa de biogás (NL/dia); Volume de biogás ($\text{Nm}^3/\text{t RSP}$); Volume de biogás (NL.Biogás/kg STV); Volume de CH_4 (NL); Volume de CH_4 (NL. CH_4/kgSTV); Potência elétrica (kWh) e Potência Elétrica (kWh/kg RSP).

Resultados e discussões

Partida do sistema

O estudo da partida do sistema considerou três ensaios iniciais. As quantidades de substrato e inóculo necessárias foram determinadas através da caracterização dos materiais que resultaram em valores médios de STV de 30.5 ± 3.1 mg/g para o lodo, 350.3 ± 11.7 mg/g para o RSP e 24.9 ± 3.3 mg/g para a mistura.

Assim, a partida do sistema foi realizada com a proporção 6:1, em termos de STV, sendo utilizados 145 kg de lodo do reator UASB e 2.7 kg de resíduos sólidos putrescíveis, respectivamente. O percentual de umidade médio foi de $94.1 \pm 0.6\%$ para o lodo, $61.9 \pm 0.3\%$ para o RSP e $95.0 \pm 0.7\%$ para a mistura.

Em termos de pH determinou-se para o lodo, o RSP e para a mistura os seguintes valores iniciais: 7.1; 4.6 e 7.3, respectivamente. O monitoramento do sistema indicou que a proporção 6:1 foi adequada para a partida do sistema já que não houve acidificação. A proporção 6:1 foi adotada para as duas primeiras bateladas, sendo a seguir descrito o monitoramento de todas elas.

Monitoramento das Bateladas

A Tabela 1 apresenta a caracterização inicial dos inóculos e substratos estudados em cada batelada. Exceto para a primeira batelada onde empregou lodo do reator UASB da ETE Unisinos, nas demais o inóculo sempre foi o biofertilizante produzido na batelada anterior, material que restou no biodigestor anaeróbio já adaptado.

A partir da mistura, nas proporções estudadas, a biodigestão foi iniciada. A Tabela 2 apresenta os valores iniciais de cada batelada monitorada.

Tabela 1. Caracterização inicial do inóculo e substrato empregados

Ensaio	Proporção Inóculo/RSP	Material Entrada	pH	ST (mg/g)	STV (mg/g)	Quantidade (kg)
B1	6:1	Lodo	6.6	97.93 ± 1.9	39.38 ± 0.0	145.00
		RSP	4.6	378.74 ± 5.3	357.07 ± 9.7	2.67
B2	6:1	Inóculo	6.8	74.42 ± 0.8	37.72 ± 0.5	148.42
		RSP	4.8	378.74 ± 5.3	357.07 ± 9.7	2.61
B3	4:1	Inóculo	7.2	68.43 ± 1.7	32.61 ± 1.2	151.03
		RSP	5.1	285.91 ± 18.5	245.87 ± 15.3	5.01
B4	3:1	Inóculo	8.6	65.35 ± 2.2	33.40 ± 2.2	156.04
		RSP	4.9	371.23 ± 13.9	306.91 ± 13.7	5.66
B5	2:1	Inóculo	8.5	54.52 ± 4.6	26.65 ± 2.3	161.70
		RSP	5.2	277.02 ± 9.6	233.18 ± 8.6	9.24

Tabela 2. Caracterização inicial das misturas

Ensaio	Proporção Inóculo/RSP	STV (mg/g)	COT (%)	NT (%)	COT:NT
B1	6:1	49.05 ± 0.38	10.16 ± 1.35	0.31	33:1
B2	6:1	50.39 ± 0.59	14.16 ± 5.69	0.31	42:1
B3	4:1	53.77 ± 6.10	13.7 ± 0.99	0.27	52:1
B4	3:1	46.15 ± 8.64	12.22 ± 1.77	0.23	53:1
B5	2:1	46.22 ± 0.30	13.31 ± 1.69	0.23	59:1

A Figura 2 foi construída para demonstrar o acompanhamento das bateladas estudadas. Como o biofertilizante resultante de cada uma delas bateladas serviu de inóculo para a próxima etapa, o gráfico foi elaborado demonstrando esta continuidade. Também houve o objetivo de aumentar a cada novo ensaio, a proporção de RSP em relação ao inóculo, sendo que esta forma de operação foi positiva, como será discutida na sequência, com a apresentação e discussão dos resultados obtidos para os parâmetros monitorados.

Como esperado, o carregamento do biodigestor anaeróbio promovia o incremento da carga orgânica no sistema. Ao mesmo tempo, este procedimento garantia a manutenção da geração do biogás e estabilização dos resíduos sólidos. A umidade da mistura, durante todos os 148 dias manteve-se na faixa de 91.7 e 94.8 %.

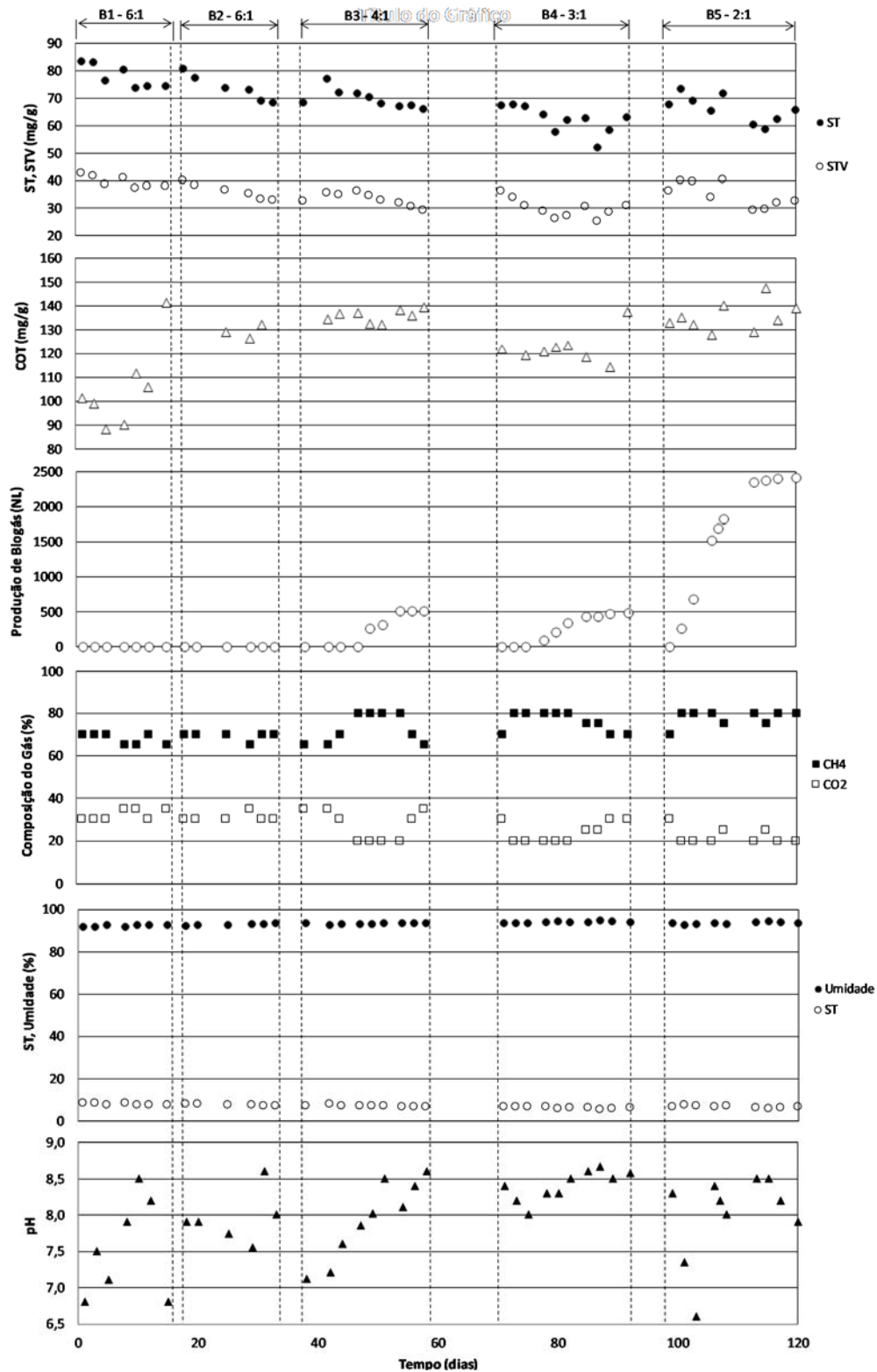


Figura 2. Desempenho operacional do sistema de digestão.

Considerando o tempo de operação de cada batelada, observa-se na Figura 2 que a eficiência na redução de concentração de sólidos totais voláteis foi de 13, 11, 15 e 11%, para as bateladas 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Porém, pode ser observado durante os experimentos que a maior remoção de sólidos totais voláteis ocorreu durante as bateladas 4 e 5, no 17^o e 15^o dia após início, respectivamente, sendo a remoção de sólidos totais voláteis de 31 e 20%, nas mesmas bateladas. O decréscimo dos STV pode ser atribuído ao consumo da fração carbônica durante o processo de digestão anaeróbia do RSP.

O acompanhamento da estabilização, realizado a partir do monitoramento de STV e COT não foi conclusivo, pouca redução foi verificada. Ou porque as bateladas foram curtas (21 dias) ou pela carência de nitrogênio do substrato. Segundo Massukado (2008), o carbono orgânico somente será degradado se houver nitrogênio suficiente para o crescimento dos microorganismos. Coimbra (2012), com biodigestão de 100 dias obtiveram reduções próximas a 44% de carbono orgânico.

A produção de biogás foi monitorada durante os ensaios. A batelada B5 obteve o maior rendimento de produção de biogás comparada as demais bateladas, sendo 78% superior a batelada B3 a qual teve o segundo maior rendimento. O pH para esta batelada se manteve ao longo do experimento dentro da faixa considerada ideal.

Nesta condição, na batelada B5, quando o pH chegou a 8.5, a produção de biogás se estabilizou, este fato pode ser atribuído ao sistema estar fora da faixa ótima, inibindo o processo de degradação e, por consequência, a produção de biogás. A proporção utilizada de RSP para inóculo foi superior em relação as demais, a qual pode ser considerada neste estudo a melhor opção para a geração de biogás.

Os resultados obtidos foram, na ordem das bateladas monitoradas de 68.3%, 68.6%, 72.8%, 76.0% e 77.8% em termos de metano no biogás. São valores próximos aos encontrados, por exemplo, no trabalho de Misi e Foster (2002) que utilizaram frutas, vegetais e carnes como substrato para a biodigestão.

Avaliação do Biofertilizante

Ao final de cada ensaio o material digerido foi caracterizado. Os resultados, estão apresentados na Tabela 3. Em todos os biofertilizantes testados, o resultado para ovos de helmintos foi <1.0 ovo /4g. A avaliação do biofertilizante considerou parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. Ao final do ensaio B1 o percentual de umidade obtido foi de 92.6% e ao final do ensaio B5 este percentual foi de 93.5%. O aumento da umidade é um comportamento esperado nos sistemas anaeróbios, uma vez que a umidade não é consumida no processo ou perdida para o ambiente e ocorre a redução da matéria orgânica na degradação dos resíduos, portanto permanecendo praticamente o mesmo volume de água para uma quantidade menor de matéria.

Tabela 3. Caracterização do material digerido em T_{final} (biofertilizante)

Ensaio	pH	ST (mg/g)	STV (mg/g)	COT (%)	NT (%)	C:N	P (%)	K (%)	PG (%)	IVG	Coliformes Termotolerantes (NMP/g)
B1	8.2	74.42 ± 0.8	37.72 ± 0.5	15.96	0.29	55:1	0.07	0	86.7 ± 4.6	21.0 ± 0.9	1.52E+04
B2	8.0	68.43 ± 1.7	32.74 ± 1.4	13.23	0.24	55:1	0.10	0	97.3 ± 4.6	23.3 ± 1.7	1.51E+04
B3	8.6	65.98 ± 0.5	29.06 ± 0.3	13.88	0.27	51:1	0.10	0	99.0 ± 2.0	24.0 ± 0.3	5.06E+03
B4	8.5	62.77 ± 1.7	30.74 ± 1.7	13.30	0.22	60:1	0.11	0	96.0 ± 3.3	23.4 ± 1.4	4.25E+03
B5	7.9	65.54 ± 0.4	32.41 ± 0.1	13.41	0.18	74:1	0.10	0	94.0 ± 2.3	22.9 ± 1.4	4.40E+03

PG: Porcentagem de Germinação; IVG: Índice de Velocidade de Germinação

Conforme Canadian C. Environment Ministerial (1996), tanto para PG como para IVG, índices acima dos 90% em relação ao controle (branco), são os parâmetros mínimos para que um composto seja considerado maduro e livre de fitotoxinas. Os resultados obtidos nos ensaios realizados apontam que apenas o ensaio B1 não apresentou valores que atendessem este padrão. Na caracterização química os resultados obtidos nos ensaios não enquadraram o biofertilizante como fertilizantes orgânicos compostos, Classe C, por não atenderem ao parâmetro Nitrogênio. A legislação atual não impõe percentuais mínimos para a presença de potássio e o equipamento utilizado não detectou este nutriente nas amostras. Igualmente não são exigidos valores mínimos para fósforo sendo que os resultados variaram de 0.7% a 0.11%, sendo que a média foi de 0.10%. A relação C:N ficou acima dos valores considerados ideais, principalmente devido à carência de nitrogênio observada tanto nos resultados finais como no carregamento do sistema. A CTC média obtida para o biofertilizante foi de $72 \pm 0.1 \text{ cmol}_c/\text{kg}$, valor considerado adequado e dentro da faixa considerada ideal pela literatura (entre 60 e 80 cmol_c/kg).

Avaliação do Biogás

Por meio dos resultados obtidos na geração de biogás foram feitas relações como: taxa de biogás por dia, volume de biogás por quilograma de STV adicionado, volume total de metano e volume total de metano por quilograma de STV adicionado. Conforme já relatado anteriormente, a taxa de geração de biogás representa a relação entre o volume de biogás ao longo dos dias decorridos no experimento. As bateladas B1, B2, B3 e B4 registraram no final do experimento taxa igual a 0.32; 0.40; 23.65 e 22.12 NL.CH₄/dia, respectivamente. A batelada B5 teve maior taxa de geração de biogás apresentando um pico de 191.53 NL.CH₄/dia (Tabela 4).

De acordo com Forster-Carneiro *et al.* (2008) frutas e verduras são os resíduos que mais produzem metano (850 NL.CH₄/kg STV). Contudo, para o caso de RSU, a capacidade de produção verificada pelos autores foi de 530 L.CH₄/kg STV. Zhang *et al.* (2011) também obtiveram valores menores (320 LCH₄/kg STV) com a digestão anaeróbia de restos de alimentos. O autor não relata que tipo de restos de alimentos (crús ou cozidos) foram utilizados na pesquisa.

Tabela 4. Produção de metano para cada batelada

Produção de metano	Batelada 1 6:1	Batelada 2 6:1	Batelada 3 4:1	Batelada 4 3:1	Batelada 5 2:1
Volume de Metano (NL.CH ₄ /dia) (NL)	2.6	6.2	415.4	379.7	1916.6
Volume de Metano (NL.CH ₄ /dia) (NL CH ₄ /kg STV)	2.8	6.6	337.3	218.6	889.5

Para este artigo, a maior geração verificada na B5 (889.5 NL.CH₄/kg STV) é conferida ao conteúdo da biodigestão: grande quantidade de restos de alimentos compostos de frutas e vegetais além de outros alimentos consumidos no restaurante universitário. Além disso, a elevada taxa de geração é resultado da estabilização obtida ao longo das bateladas sequenciais. Os resultados, na íntegra, das cinco bateladas monitoradas por este estudo estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resumo dos resultados de produção de biogás e metano das bateladas

Item	B1 – 6:1	B2 – 6:1	B3 – 4:1	B4 – 3:1	B5 – 2:1
Massa de STV adicionada (kg)	0.95	0.93	1.23	1.74	2.15
Massa de RSP adicionada (kg)	2.67	2.61	5.01	5.66	9.24
Volume de biogás (NL)	3.8	8.8	520.4	486.5	2416.1
Taxa de Biogás (NL/dia)	0.3	0.4	23.7	22.1	109.8
Volume de Biogás (Nm ³ /t RSP)	1.4	3.4	103.9	86.0	261.5
Volume de Biogás (NL.Biogás/kg STV)	4.0	9.5	422.5	280.1	1121.3
Volume de CH ₄ (NL)	2.6	6.2	415.4	379.7	1916.6
Volume de CH ₄ (NL.CH ₄ /kg STV)	2.8	6.6	337.3	218.6	889.5
Potência elétrica (kWh)	0.01	0.01	0.94	0.84	4.31
Potência elétrica (kWh/kg RSP)	0.00	0.00	0.19	0.15	0.47

A geração de energia elétrica é um dos fatores principais para o reaproveitamento de resíduos sólidos putrescíveis, portanto, conhecer essa capacidade é fundamental para verificar o desempenho do sistema e sua viabilidade energética. Neste trabalho, optou-se por analisar a batelada B5 referente a questão energética, visto que, nesta etapa, o sistema apresentou-se estabilizado e produziu os melhores resultados para a geração biogás.

Os resultados da B5 determinaram que a potência elétrica obtida foi de 4.31 kWh. Se o potencial energético calculado anteriormente fosse aplicado para o consumo de energia na própria operação do biodigestor anaeróbio (moto-reductor, bomba de recirculação e resistências para aquecimento da água) o balanço energético seria positivo igual a 1.21 kWh, novamente confirmando a potencialidade de uso do sistema em estudo.

A potência elétrica por quilograma de RSP utilizada na batelada B5 foi igual a 0.47 kWh/kg RSP. Este é um resultado atraente já que a Empresa de Pesquisa Energética (2008) indica uma faixa de 0.12 e 0.29 kWh/kg RSP.

Conclusão

A proporção de 6:1 adotada, lodo e substrato respectivamente, para partida do sistema mostrou-se adequada, não permitindo que ocorresse acidificação. O pH se manteve na maioria do tempo dentro da faixa considerada ideal, apresentando-se levemente alcalino em dados momentos. A eficiência na remoção de matéria orgânica foi inferior ao ideal devido a carência de nitrogênio apontada nas elevadas relações carbono:nitrogênio apresentadas.

Fisicamente o biofertilizante apresentou umidade acima da especificada, sendo seu uso direto possível apenas por aspersão. Quimicamente o produto gerado apresentou carência de macronutrientes como nitrogênio e fósforo, sendo que o potássio não foi detectado em nenhuma amostragem. A capacidade de troca catiônica (CTC) apresentou resultados abaixo da média para este tipo de tratamento, porém ainda adequado para uso como condicionador de solo já que os resultados obtidos são superiores em relação a maioria dos tipos de solos do país.

Os parâmetros microbiológicos foram parcialmente atendidos, com resultados satisfatórios para ovos de helmintos e insuficientes para coliformes termotolerantes, os quais ficaram acima do limite permitido.

Entre as proporções estudadas a batelada B5 com alimentação 2:1 (inóculo:resíduos sólidos putrescíveis) foi a que apresentou melhor desempenho, obtendo os maiores volumes de biogás produzido, na ordem de 2416,12 NL. Esta batelada foi aquela onde se produziu os maiores teores de metano, com média igual a 77.8%.

Os resultados da batelada B5 determinaram que a potência elétrica obtida foi de 4.31 kWh. Este valor, se aplicado para o consumo de energia na própria operação do biodigestor anaeróbio (moto-redutor, bomba de recirculação e resistências para aquecimento da água), resultaria em balanço energético positivo igual a 1.21 kWh. Este índice confirma a potencialidade de uso do sistema em estudo.

Agradecimentos

Agradecemos à PETROBRAS pelo patrocínio do projeto VERDESINOS.

Referencias bibliográficas

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, Banco Nacional de Informações sobre geração, (2016). Acesso em 14 de outubro de 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>
- APHA, American Public Health Association (2012) Standard methods for the examination of water and wastewater. 22 ed., Washington, American Public Health Association Pub., 1935pp.
- Ayres R, Mara, D. (1996) *Analysis of wastewater for use in agriculture. A laboratory manual of parasitological and bacteriological techniques*. Geneva: WHO, 1996. 31pp.
- German Biogas Association (2015) *Biogas an all-rounder. New opportunities for farming, industry and the environment*, 4th fully revised edition, Sunbeam GmbH, Germany, 89 pp. Acesso em 20 de maio de 2015, disponível em: https://www.google.com.br/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://energypedia.info/images/a/a3/Biogas_-_Opportunities_for_Farming%252C_Industry_and_Environment.pdf&ved=2ahUKewji7jHzPreAhVBEZAKHazuBN0QFjABegQICBAB&usg=AOvVaw285yLjpSqF_4BWm4jqill3
- Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2009) Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução normativa n^o 25, de julho de 2009, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Judiciário, Brasília, DF, 23 jul. 2009.
- Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2006) Secretaria de Apoio Rural e Cooperativismo, Instrução normativa n^o 27, de junho de 2006, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Judiciário, Brasília, DF, 09 jun. 2006.
- CCME, Canadian C. Environment Ministerial (1996) Guidelines for compost quality, Toronto, 106pp.
- Coimbra, G.F. Avaliação da eficiência da remoção de nitrogênio total e carbono orgânico total (2012.) UNIVATES, Lajeado.
- Dilallo, R., Alberston O.E. (1961) Volatile acids by direct titration, *Journal of water pollution control federation*, **33**(4), 356-356.
- EPE, Empresa de Pesquisas Energéticas (2008) Ministério de Minas e Energia (BRASIL), Nota Técnica Den. 06/08: Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. Rio de Janeiro, 73p. nov. 2008.
- Foster-Carneiro, T.F., Pérez, M., Romero, L.I. (2008) Influence of total solid and inoculums contents on performance of anaerobic reactors treating food waste, *Bioresource Technology*, **99**, 6994–7002.
- MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2014) Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos. Brasília: MAPA/SDA/CGAL. 220pp.
- Massukado, L.M. (2008) Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP.

- Misi, S.N., E Forster, C.F. (2002) Semi-continuous anaerobic codigestion of agro-wastes. *Environmental Technology*, **23**(4), 445–451.
- Reichert, G.A. (2005) Aplicação da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos: uma revisão. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23ª ed., 2005, Campo Grande. Anais. ABES: Campo Grande.
- SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2015) Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos. Acesso em 20 de novembro de 2017. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2015>
- Silva, H.W., Pelícia, K. (2012) Manejo de dejetos sólidos de poedeiras pelo processo de biodigestão anaeróbica, *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)*, **2**(1), 151-155, Julho, 2012.
- Silva, F.A. de M., Villas Bôas, R.L. (2007) Teste de germinação como indicador de maturação em composto orgânico, *Revista Energia na Agricultura*, **22**(2), 63-73.
- Tchobanoglous, G, Theisen, H., Vigil, S. (1993) Integrated solid waste management, *Engineering principles and management issues*, New York: Mc Graw-Hill, 978pp.
- Walker, L.R., Ruwisch, R.C., Sciberras, S. (2011) Performance of a commercial-scale dicom™ demonstration facility treating mixed municipal solid waste In. International conference on Solid Waste Moving Towards Sustainable Resource Management.
- Zhang, L., Lee, Y.W., Jahng, D. (2011) Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: focusing on the role of trace element, *Bioresour. Technol.* **102**(8), 5048–5059. doi: 10.1016/j.biortech.2011.01.082.