

DESGASEIFICAÇÃO E PARTIDA DE BIODIGESTOR ANAERÓBIO: Tratamento da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos

NIZER, João Victor Tischler¹
ASSIS, Tatiane Martins de²
BARANA, Ana Cláudia³

RESUMO: Os resíduos sólidos municipais apresentam elevada concentração de matéria orgânica, expressa pela relação entre sólidos voláteis (SV) e sólidos totais (ST), que pode ser utilizada para produção de energia. Visando valorizar estes resíduos, este estudo objetivou apresentar uma nova proposta de controle da relação FOS/TAC (termo alemão utilizado para referenciar a relação entre alcalinidade total e acidez volátil) do processo de digestão anaeróbia em reator do tipo CSTR, utilizou-se paradas na alimentação do reator, ao invés da adição de agentes alcalinizantes, para reequilibrar a relação FOS/TAC. O processo foi avaliado pela correlação entre a relação FOS/TAC, produção de AOV (ácidos orgânicos voláteis) e produção de biogás e metano. O experimento foi conduzido por meio da caracterização do substrato, avaliação da estabilidade por meio da desgaseificação do inóculo e a aplicação de duas COV (cargas orgânicas volumétricas): de 0,5 e 1,0 g SV L⁻¹ d⁻¹. Com COV de 1,0 g SV L⁻¹ d⁻¹ observou-se remoção de SV de até 95% e produção de 0,2 ± 0,1 L_{Biogás} L_{Reator}⁻¹ d⁻¹, com teor médio de metano de 50%. Analisando-se os resultados obtidos pode-se considerar a digestão anaeróbia da FORSU um tratamento viável com aplicação de carga orgânica de até 1.0g SV L⁻¹ d⁻¹ sem adição de produtos químicos, o que a torna de baixo custo e sustentável, e com o controle do processo pela análise de FOS/TAC.

PALAVRAS-CHAVE: Digestato; Energia limpa; FORSU; Desenvolvimento sustentável; Gás metano.

1 INTRODUÇÃO

A fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU) é proveniente do descarte de alimentos domésticos, restaurantes, supermercados, feiras livres dentre outras atividades. Mesmo quando disposto em aterros sanitários, a FORSU contribui para a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Já em países em desenvolvimento

¹ Mestre e Doutorando/Bolsista do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, UEPG, *Campus* de Uvaranas, 2330030002@uepg.br / joaotischler.uepg@gmail.com.

² Pós-Doutora pelo programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Professora formadora do Curso de Tecnologia em Mineração, UEPG, *Campus* de Uvaranas, tatiane.assis@uepg.br.

³ Professora Adjunta do Curso de Engenharia de Alimentos, docente do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, UEPG, *Campus* de Uvaranas, acbarana@uepg.br.

a situação é agravada, pois ainda é comum o descarte desse material em aterros irregulares que, além da emissão de GEE para a atmosfera, liberam poluentes para o solo e recursos hídricos, depreciando a qualidade do ambiente onde estão instalados (MARIA *et al.*, 2014).

O biogás gerado pela FORSU possui potencial de conversão em energia, principalmente pela presença de metano e até mesmo hidrogênio, dependendo da via metabólica utilizada pelos microrganismos no momento da degradação da matéria orgânica (MATTEO *et al.*, 2017).

O processo de digestão anaeróbia é complexo devido ao envolvimento de diversas comunidades microbianas que desenvolvem uma série de reações bioquímicas interdependentes (MATOS *et al.*, 2020) e um dos principais parâmetros para o controle da digestão anaeróbia é a carga orgânica volumétrica (COV). Para sistemas estabilizados, uma maior carga aplicada significa maior capacidade de tratamento de resíduos e consequente maior produção de biogás (LILI *et al.*, 2011), tornando-se uma questão crucial para o processo.

No monitoramento dos reatores anaeróbios, a verificação da alcalinidade torna-se uma importante avaliação devido a sensibilidade dos microrganismos que degradam a matéria orgânica em relação ao pH, que se apresenta em escala logarítmica, significando que pequenas reduções em seus valores, necessitam de um consumo de elevada de alcalinizante, diminuindo a capacidade de tamponamento do meio (MARIA *et al.*, 2014).

Diante do potencial de aproveitamento energético do FORSU e de estudos escassos no emprego de FORSU em mono-digestão em CSTR sem adição de compostos alcalinizantes, o objetivo deste trabalho foi avaliar o processo da digestão anaeróbia da FORSU sem alcalinizantes, com COV variando de 0,5 a 1,0g SV L⁻¹ d⁻¹ utilizando a relação FOS/TAC.

2 METODOLOGIA

O experimento foi realizado no Laboratório de Estudos de Meio Ambiente (LEMA) do Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

2.1 Configuração do Biodigestor

O Foi realizado em um CSTR construído em inox, marca TECNAL® modelo N480D – V3.2X, com volume útil de 50 L e mantido a 30°C, com o auxílio de uma resistência interna ligada a um termostato (NANDI *et al.*, 2020). A quantificação do biogás foi realizada através de um gasômetro com volume de 10L construído em PET (polietileno tereftalato) e preenchido com solução salina acidificada (pH 1,75) (25% NaCl + 3% H₂SO₄). O volume de biogás total gerado foi determinado medindo-se o volume de solução deslocado.

2.2 Inóculo e Substrato

O inóculo e o substrato utilizados na alimentação do reator foram coletados em uma Usina Termoelétrica a Biogás (UTB) localizada no município de Ponta Grossa (PR - Brazil). O inóculo utilizado foi o digestato coletado de um reator CSTR da UTB e o substrato foi coletado no tanque de equalização, onde a fração orgânica já estava triturada e homogeneizada. O resíduo era coletado e logo em sequência armazenado em sacos plásticos de 1kg e congelados a -18°C até seu uso. No dia anterior à alimentação o substrato era descongelado em geladeira a 5°C e novamente triturado para, então, ser inserido no reator.

2.3 Operação do Biodigestor

Inicialmente o reator foi alimentado com 34 L de inóculo e 16 L de água destilada para se fazer a estabilização e degaseificação do mesmo. Considerou-se

o inóculo como estável quando a relação FOS/TAC chegou a 0,3, conforme sugerido por Lili *et al.* (2011), o que durou 12 dias.

A partida do sistema se deu em regime de alimentação diária. Para tanto, utilizou-se COV inicial de 0,5 g SV L⁻¹ d⁻¹ (Fase de partida), após a estabilização por meio da relação FOS/TAC, a COV foi sucessivamente aumentada para 1,0 g SV L⁻¹ d⁻¹ (Tabela 1). Considerou-se cada fase como estabilizada quando a relação FOS/TAC era igual a 0,3 (LILI *et al.*, 2011).

Tabela 1: Condições operacionais nas diferentes fases de operação.

Fases	Q (Kg _{Resíduo} d ⁻¹) ⁽¹⁾	Amostragem	COV ⁽²⁾	Dias de Operação	TDH (dias) ⁽³⁾
I	0,2	n=1	0,5 g SV L ⁻¹ d ⁻¹	4	250
II	0,4	n=1	1,0 g SV L ⁻¹ d ⁻¹	10	125

⁽¹⁾ Q = Vazão. ⁽²⁾ COV = Carga Orgânica Volumétrica. ⁽³⁾ TDH = Tempo de Detenção Hidráulica.

Fonte: O autor.

A alimentação era feita manualmente pela mangueira de entrada do substrato na parte superior do reator. Antes de realizar a alimentação fazia-se a coleta do digestato para as análises necessárias.

2.4 Análise de Acompanhamento e Estatística de dados

Para o acompanhamento do processo de digestão anaeróbia foram realizadas as seguintes análises: Sólidos Totais e Voláteis, Nitrogênio Total Kjeldahl, Nitrogênio Amoniacal segundo metodologia da APHA (2008); Ácidos Orgânicos conforme TELES *et al.* (2019); FOS/TAC conforme LILI *et al.* (2011); medição de Biogás e Metano conforme WALKER *et al.* (2009) e LEITE *et al.* (2021).

Para análise estatística utilizou-se o software Statistic®, versão 14.0.4. Foi realizado teste de normalidade dos dados e teste de correlação Pearson entre as variáveis respostas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização e Desgaseificação do Inóculo

O teor de SV do inóculo foi de 11,9 g SV kg⁻¹ e a relação SV/ST indicaram que 71% do inóculo eram potencialmente digeríveis, como apresentado na tabela 7. De acordo com VDI 4630 (2006), valores de SV/ST superiores a 50% no inóculo indicam que este tem grande potencial de uso no processo de digestão anaeróbia. O inóculo utilizado no reator, levou 12 dias para atingir uma condição de estabilidade. O inóculo foi considerado estável quando a relação FOS/TAC estava na faixa de 0,3-0,4 (LILI *et al.*, 2011).

Observou-se que a produção de biogás ocorreu desde o primeiro dia de inoculação (Figura 1). O volume de biogás gerado diariamente foi inversamente proporcional ao FOS/TAC. Os valores de pH sofreram alterações variando de 6,71 a 7,63. Srisowmeya *et al.* (2020) citam que a faixa de pH ideal para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas deve estar entre 6,5 e 7,5, valores encontrados em quase todos os dias da fase de adaptação do inóculo.

A produção máxima de biogás aconteceu no décimo dia, com relação FOS/TAC de 0,3. Lili *et al.* (2011), observaram que, apesar de muitos autores sugerirem que valores de FOS/TAC entre 0,3 e 0,4 são considerados ideais para digestão anaeróbia, cada sistema tem seu próprio valor ótimo de FOS/TAC, que pode estar relacionado à qualidade do substrato em relação a biodisponibilidade de carbono. A importância da avaliação da alcalinidade representada pela relação FOS/TAC é significativa, pois alerta para uma possível sobrecarga orgânica.

3.2 Caracterização do Substrato

Os teores de SV e percentual de SV/ST estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Teor de ST, SV, NTK, N-NH₄ e potencial digerível do lote utilizado.

Data de Coleta	Substrato	ST (g kg ⁻¹)	SV (g kg ⁻¹)	NTK (g kg ⁻¹)	N-NH ₄ + (g kg ⁻¹)	SV/ST (%)
27/07/2021	Lote 1	144	132	4,06	0,63	92

Onde: ST = Sólidos Totais; SV = Sólidos Voláteis; NTK = Nitrogênio Total Kjeldahl; N-NH₄ + = Nitrogênio Amoniacal. Fonte: O autor.

A concentração de SV/ST encontrada foi de 92% indicando que quase 100% dos sólidos eram potencialmente digeríveis.

3.3 PARTIDA DO REATOR (COV = 0,5 g SV L⁻¹ d⁻¹)

Após a aclimatação do inóculo, foi iniciada a partida do reator. Que teve duração de 4 dias, no segundo dia nesta fase o índice de FOS/TAC chegou a 0,6 e no último dia de operação nesta COV (quarto dia) este índice caiu para 0,3, o pH do digestato oscilou entre 7,68 e 8,16, indicando que a faixa de pH estava adequada para o desenvolvimento da metanogênese, relacionado a amônia. Autores como Lee *et al.* (2009) citam que a metanogênese é mais eficiente em faixa de pH de 6,5 a 8,2. A eficiência relacionada à conversão do SV em gás apresentou média de 95±0,01% (Figura 1), com produção média de biogás de 0,083±60 L_{Biogás} L_{Reator} d⁻¹ e teor de metano de 40%, sendo constante durante os quatro dias de operação nesta condição.

Souza *et al.* (2021) avaliaram o teor de sólidos presente na massa co-digerida de resíduos orgânicos e grama e compararam a produção de biogás e a redução de matéria orgânica biodegradável. Após concluída a co-digestão, o tratamento com proporção de 2:1 (grama:resíduos alimentares) apresentou resultados de produção máxima de biogás de 1,8 L_{Biogás} L_{Reator} d⁻¹.

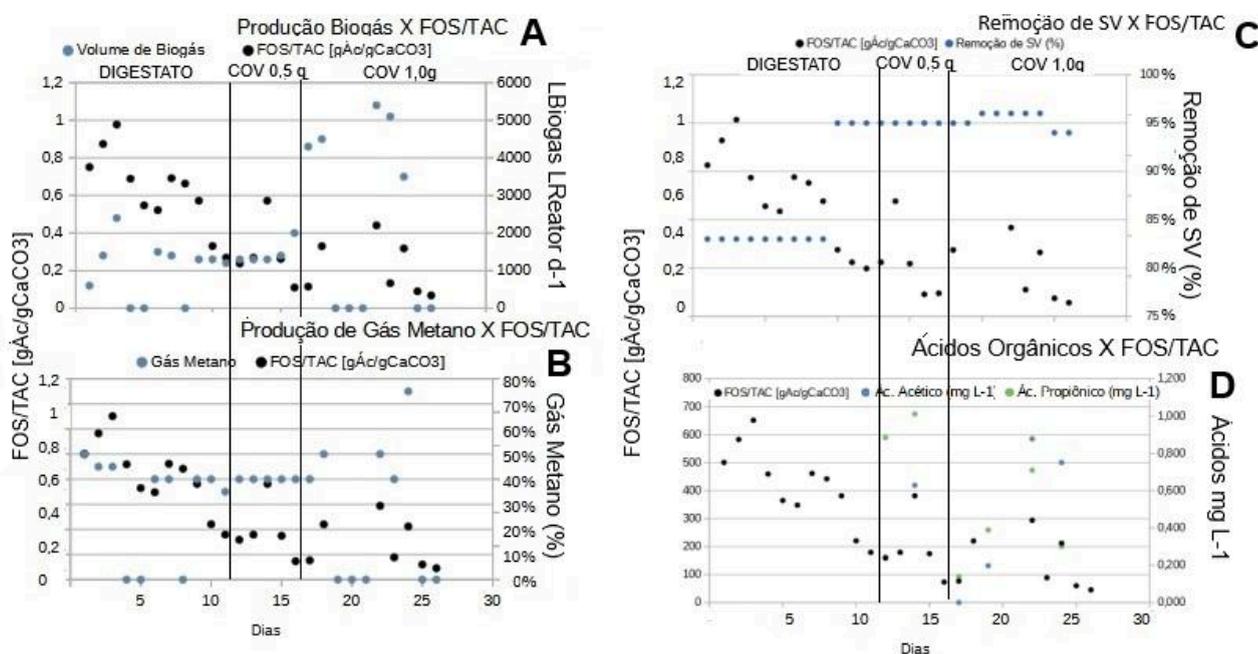
A relação ácido acético/ácidos orgânicos totais encontrada no digestato durante a Fase I foi de 21% (mínima) e 37% (máxima). Em contrapartida, a relação ácido propiônico/ácidos orgânicos totais foi de 78% e 60%, respectivamente, com FOS/TAC próximo a 0,6, indicando possível sobrecarga orgânica do sistema. O acúmulo de ácido propiônico nesta fase pode ter impactado na produção de metano, chegando à concentração de 40%.

A etapa da metanogênese na digestão anaeróbia ocorreu de forma lenta, apesar do baixo índice de relação FOS/TAC no último dia de operação na COV de 0,5 g SV Kg⁻¹ d⁻¹ os resultados iniciais da COV de 1,0 g SV Kg⁻¹d⁻¹ ainda refletem o comportamento da partida do reator.

3.4 COV = 1,0 g SV L⁻¹ d⁻¹

Nessa fase experimental o pH do digestato variou entre 7,49 e 7,86, estando na faixa adequada para a ocorrência de metanogênese (RABII *et al.*, 2019).

Figura 1 - Gráfico do comportamento do processo de digestão anaeróbia. Produção de Biogás (A), Produção de gás metano (B) Ácidos Orgânicos (C) e Remoção de Sólidos Voláteis (D).



Fonte: O autor.

A eficiência na remoção de SV, equivalente a conversão de matéria orgânica em biogás, foi de 94 e 95%, com produção biogás de 0,25 e 0,47 L_{Biogás} L_{Reator} d⁻¹ e metano de 50 e 55%, respectivamente, durante os dez dias de operação nesta condição. O rendimento de gás metano em relação a produtividade de biogás foi constante. Os elevados percentuais de remoção de SV nesta pesquisa podem estar relacionados ao diâmetro da tubulação de coleta de digestato, pois esta restringiu que os sólidos presentes passassem gerando um filtro, desta forma a amostra

coletada tenha uma característica mais líquida, não representando a amostra como um todo.

A pesquisa de Le Pera *et al.* (2021), corrobora a presente pesquisa, pois, ao analisar o desempenho de uma planta industrial que realizava o tratamento da FORSU por meio da digestão anaeróbia, em alimentação contínua com TDH de 22 dias os pesquisadores obtiveram produção média de 191 e 860 m³ de biogás ton COV d⁻¹ com teor médio de metano de 59%. Em contrapartida, a remoção de SV foi de 62%, caracterizando-se menor em relação à presente pesquisa. Ao decorrer dos dias utilizando a COV 1,0 g SV Kg⁻¹d⁻¹ notou um aumento significativo na concentração de gás metano com a diminuição do percentual de ácido propiônico.

O valor de FOS/TAC não apresentou grandes variações durante esta fase, chegando a valor máximo de 0,4 no sexto dia de operação. A diminuição significativa no percentual de ácido propiônico no reator e o acúmulo de ácido acético pode ter se dado pela adaptação das arqueas metanogênicas durante esta fase. O ácido predominante foi o acético, com concentração média de 304±282 mg L⁻¹, seguido pelo butírico com 274±443 mg L⁻¹ e propiônico com 256±160 mg L⁻¹.

3.5 Análise estatística

Uma vez comprovada a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-wolks a 5% de significância, o teste de correlação de Pearson foi aplicado (Tabela 3).

Tabela 3: Matriz de correlação linear de Pearson

Variáveis	CH ₄	Biogás	Acét.	Prop.	FOS/TAC	ST
CH ₄		-0,11	0,18		0,32	0,03
Biogás	-0,11		0,09	-0,08	0,41	0,07
Acét.	0,19	0,09		0,67	0,50	0,39
Prop.	0,01	-0,08	0,67		0,29	0,10
FOS/TAC	0,32	0,40	0,50	0,29		0,11
ST	0,03	0,07	0,39	0,10	0,11	

Nota: Valores em itálico possuem p < 0,05. Valores destacados em vermelho apresentam uma correlação significativa no estudo.

Conforme a Tabela 3, foi encontrada correlação entre os valores de FOS/TAC e o ácido acético, e entre os valores de ácido acético e ácido propiônico. Na tabela de correlação pode-se destacar a correlação de 0,67 entre teor de ácido acético e ácido propiônico e de 0,50 entre teor ácido acético e FOS/TAC, como o aumento na geração de ácidos ocorreu o aumento do FOS/TAC e a diminuição da capacidade de tamponamento do sistema.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Perante os dados obtidos podemos concluir que o processo de conversão da matéria orgânica de FORSU foi digerido de forma eficiente e otimizada, isso pelo fato de que seu potencial digerível (SV/ST) foi de 92% o que gerou uma produção de gás metano de até 75%.

5 AGRADECIMENTOS

À prefeitura de Ponta Grossa, e a UTB pela oportunidade de realizar a pesquisa. À CAPES pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for examination of water and wastewater**. 21st ed. Washington D.C.: American Public Health Association, 2005.

LEE D. H.; BEHERA S. K.; KIM J. W.; PARK H. S. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab-scale study. **Waste Manage**, v. 29, n. 2, p. 876–82, feb. 2009.

LEITE, J. G. B. S.; SANTOS, R. S.; LIMA, G. S.; SILVA, C. C.; ASSIS, F. G. V.; OLIVEIRA, E. A. Co-digestão anaeróbia de manipueira, casca de café e esterco bovino: Um estudo de otimização do processo de metanização. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 1334-1355, jan. 2021.

LE PERA, A.; SELLARO, M.; MIGLIORI, M.; BIANCO, M.; ZANARDI, G. Dry Mesophilic Anaerobic Digestion of Separately Collected Organic Fraction of Municipal Solid Waste: Two-Year Experience in an Industrial-Scale Plant. **Processes**, v. 9, n. 2, jan. 2021.

LILI, M.; BIRÓ, G.; SULYOK, E.; PETIS, M.; BORBÉLY, J.; TAMÁS, J. Novel approach on the basis of FOS/TAC method. International Symposia. **“Risk Factors for Environment and Food Safety” & “Natural Resources and Sustainable**, Nov. 2011.

NANDI, R.; SAHA, C. K.; SARKER, S.; HUDA, M. S.; ALAM, M. M. Optimization of reactor temperature for continuous anaerobic digestion of cow manure: Bangladesh perspective. **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 1-19, oct. 2020.

MATOS, J. C. S.; ROZENSKY, L.; VRBA, Z.; HANSEN, J. M.; HÁJEK, M.; LÍPA, J.; RODRIGUES, C. V.; LUZ, F. G. F.; CASTRO, M. C. A. A.; MAINTINGUER, S. I. Application of electromagnetic field in anaerobic biodigestion in batch reactors. **Bio Resources**, v. 15, n. 3, p. 4972-4981, 2020.

MATTEO, U. D.; NASTASI, B.; ALBO, A.; GARCIA, D. A. Energy Contribution of OFMSW (Organic Fraction of Municipal Solid Waste) to Energy-Environmental Sustainability in Urban Areas at Small Scale. **Energies**, v. 10, n. 2, feb. 2017.

MARIA, F. D.; SORDI, A.; CIRULLI, G.; GIGLIOTTI, G.; MASSACCESSI, L.; CUCINA, M. Co-treatment of fruit and vegetable waste in sludge digesters. An analysis of the relationship among bio-methane generation, process stability and digestate phytotoxicity. **Waste Management**, v. 34, n. 9, p. 1603-1608, sep. 2014.

RABII, A.; ALDIN, S.; DAHMAN, Y.; ELBESHBISHY, E. A Review on Anaerobic CoDigestion with a Focus on the Microbial Populations and the Effect of Multi-Stage Digester Configuration. **Energies**, v. 12, n. 6, mar. 2019.

SOUZA, F. M.; JAEGER, J. M. S.; VIANA, E.; CANDIANI, G.; SIMÕES, A. F.; FILHO, H. F. Avaliação da produção de biogás a partir da co-digestão de resíduos sólidos orgânicos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 3, mar. 2021.

SRISOWMEYA, G.; CHAKRAVARTHY, M.; DEVI, N. Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, mar. 2020.

TELES, J. C. **Produção de ácido propiônico por Propionibacterium acidipropionici a partir da fermentação de efluentes industriais**. 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa (PR), 2016.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure. **VDI 4630**: fermentation of organic materials characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Alemanha: VDI, 2006.

WALKER, M. ZHANG, Y.; HEAVEN, S.; BANKS., C. Potential errors in the quantitative evaluation of biogas production in anaerobic digestion processes. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 24, p. 6339–6346, dec. 2009.