

Análise de estabilidade de um protótipo de biodigestor anaeróbio mesofílico digerindo resíduo alimentar

Stability analysis of a mesophilic prototype anaerobic digester using of food waste

Matheus Vitor Diniz Gueri¹, Andreia Cristina Furtado¹, Waldir Nagel Schirmer², Osvaldo Kuczman³

¹ Universidade Federal da Integração Latino-Americana - UNILA, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil

² Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO, Irati, Paraná, Brasil

³ Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Cascavel, Paraná, Brasil

Contato: guerieng@gmail.com

Palavras-Chave

biogás
digestão anaeróbia
reator anaeróbio
metano

Key-word

biogas
anaerobic digestion
anaerobic reactor
methane

RESUMO

A digestão anaeróbia é uma alternativa para o aproveitamento de resíduos alimentares para a geração de energia limpa. O presente estudo analisou a eficiência de um protótipo de biodigestor anaeróbio digerindo resíduos alimentares, verificando o potencial de geração de metano e os principais parâmetros de estabilidade do processo. O protótipo de biodigestor anaeróbio de 408 L foi desenvolvido com mecanismos de agitação e controle de temperatura e foi operado em modo de alimentação semi-contínuo. Foram verificados os parâmetros: sólidos, pH, ácidos graxos voláteis (AGV), alcalinidade, relação acidez volátil e alcalinidade total (AV/AT) e carga orgânica. Após a partida do processo de digestão anaeróbia foi elevando-se gradativamente a carga orgânica no biodigestor, respeitando os limites aceitáveis representados relação AV/AT e pH. Assim que o protótipo de biodigestor anaeróbia apresentou estabilidade operando próximo da sua capacidade máxima, foi possível obter reduções da DQO e SV, respectivamente, com os percentuais de 82,34 e 90,22%. Foi possível alcançar a produção específica de metano de 0,444 Nm³ CH₄.kgSVr⁻¹. A produção diária de biogás foi, em média, de 220 Lbiogás.d⁻¹ e a produção volumétrica de biogás foi de 0,540 L.Lr⁻¹.d⁻¹. Também se verificou a estabilidade do biodigestor, que apresentou, em média, a relação AV/AT de 0,49, dentro do esperado para a digestão anaeróbia de resíduos alimentares. Conclui-se que os resíduos alimentares são biodegradáveis e suscetíveis a ação microbiana por meio da digestão anaeróbia, sendo aconselhável que durante a partida e aumento de carga orgânica dos reatores anaeróbios ocorra um intenso monitoramento das variáveis de controle de modo a evitar problemas como a queda do pH e o acúmulo de ácidos graxos voláteis. Portanto, sugere-se intensificar os estudos utilizando cosubstratos alternativos com resíduos alimentares.

ABSTRACT

Anaerobic digestion is an alternative for using food waste to generate clean. The present study analyzed the efficiency of a prototype anaerobic digester digesting food waste, verifying the potential of methane generation and the main parameters of process stability. The prototype anaerobic digester of 408 L was developed with mechanisms of agitation, temperature control and was operated in semi-continuous feeding mode. The following parameters were verified: solids, pH, volatile fatty acids (VGA), alkalinity, volatile acidity and total alkalinity ratio (VA/TA) and organic load. After the start of the prototype anaerobic digester, the organic load in the digester was gradually increased, respecting the acceptable limits represented by the VA/TA ratio and pH. As soon as the prototype anaerobic digester showed stability operating close to its maximum capacity, it was possible to obtain reductions in COD and VS, respectively, with the percentages of 82.34 and 90.22%. It was possible to achieve a specific methane production of 0.444 Nm³ CH₄.kgSVr⁻¹. The daily production of biogas was, on average, 220 Lbiogás.d⁻¹ and the volumetric production of biogas was 0.540 L.Lr⁻¹.d⁻¹. The stability of the digester was also verified, which resulted, in average, the VA/TA ratio of 0.49, within the expected for anaerobic digestion of food waste. It is concluded that food wastes are biodigestible and susceptible to microbial action through anaerobic digestion, and it is advisable that during the start-up and increase in organic load of anaerobic reactors, an intense monitoring of control variables occurs in order to avoid problems such as drop in pH and accumulation of volatile fatty acids. Therefore, it is suggested to intensify the studies using alternative co-substrates with food waste.

Informações do artigo

Recebido: 26 de abril, 2021

Aceito: 07 de outubro, 2021

Publicado: 22 de dezembro, 2021

Introdução

O Brasil apresenta uma elevada geração de resíduos, principalmente os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). A geração desses resíduos é inerente ao crescimento econômico nos países em desenvolvimento. Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) apontam um aumento de 18,5% na geração de RSU entre os anos de 2010 a 2019, equivalente a 79 milhões de toneladas de resíduos (ABRELPE, 2020).

Entretanto, a disposição final dos RSU no Brasil ainda é muito preocupante, uma vez que apenas 59,5% (em peso) dos RSU teve sua disposição final adequada em 2019 (ABRELPE, 2019). Ou seja, aproximadamente 29 milhões de toneladas de resíduos não tiveram uma disposição final correta (ABRELPE, 2020). Portanto, é evidente que o manejo adequado destes resíduos deva ser assegurado para minimizar os possíveis impactos ao meio ambiente e a saúde pública.

A composição dos RSU é bastante heterogênea, constituída, em média, por 50% de material orgânico nos quais os Resíduos Alimentares (RA) são majoritários nesta composição, denominada de Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU) (ZAGO e BARROS, 2018). Nesse sentido, novas técnicas de manejo e destinação final vêm sendo estudadas para o reaproveitamento dos componentes da FORSU, promovendo a redução no volume dos RSU e atendendo às premissas da Lei nº 12.305/10, uma vez que são materiais passíveis de reaproveitamento (BRASIL, 2010).

Dentre elas, o uso da tecnologia de Digestão Anaeróbia (DA) como forma de tratamento para alguns constituintes da FORSU, como os RA, além de reduzir o potencial contaminante desses resíduos também oportuniza a recuperação energética por meio do biogás, caracterizando-se como uma ferramenta fundamental para assegurar a qualidade do meio ambiente e contribuir para a segurança energética no país.

Os RA são constituídos basicamente por cereais, carnes, massas, embutidos, ovos, frutos e verduras, entretanto sua composição pode variar consideravelmente de acordo com os hábitos alimentares locais. No Brasil, o RA é gerado em grandes quantidades nos estabelecimentos do segmento de alimentação, tais como restaurantes comerciais e coletivos, churrascarias, pizzarias, lanchonetes e bares, onde são originados das sobras dos alimentos preparados e não consumidos e dos alimentos que são servidos e não consumidos (ZANDONADI e MAURICIO, 2012). Além disso, uma vez que a geração de RA está ligada a todas as etapas da cadeia alimentar humana, quanto maior for a demanda por alimentos maior será a geração de RA (ZHANG et al., 2014).

Os RA podem ser aproveitados por diferentes rotas tecnológicas que promovem a recuperação energética e de nutrientes. Dentre elas, a rota biológica tem se apresentado com maior relevância, principalmente pelo processo de DA, uma vez que mineraliza a matéria orgânica e simultaneamente produz o biogás contendo metano (CH₄) que pode ser aproveitado energeticamente e um efluente rico em nitrogênio, fósforo e outros minerais

que pode ser utilizado para melhorar a fertilidade e textura dos solos (WOON e LO, 2016). A DA consiste em um processo microbiológico natural que proporciona interações enzimáticas e metabólicas sobre compostos orgânicos (biomassa residual), convertendo-os principalmente em matéria estabilizada, metano e dióxido de carbono (CO₂). Neste processo, a formação do metano ocorre em ambientes onde o oxigênio, o nitrato e o sulfato não estejam disponíveis como aceptores de elétrons (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993; CHERNICHARO, 2007; PITK et al., 2013). Vale ressaltar que no processo de DA também pode ocorrer a etapa de redução de sulfatos (sulfetogênese), especialmente quando a degradação ocorre em substratos ricos em proteínas. As Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) envolvidas nessa etapa são capazes de utilizar toda a cadeia de ácidos graxos voláteis (AGV), hidrogênio, metanol, etanol, glicerol, açúcares, aminoácidos e acetato para o seu metabolismo, tornando-as concorrentes em comum por substrato com as acetogênicas e metanogênicas, perturbando a relação simbiótica que há entre estes microrganismos, levando a uma menor eficiência geral no processo e, conseqüentemente, menores teores de metano (CHERNICHARO, 2007).

A DA representa um sistema ecologicamente balanceado, em que diversos microrganismos operam simbioticamente em duas etapas: digestão ácida e digestão metanogênica (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993). Entretanto, outro aspecto relevante que pode afetar a simbiose entre os microrganismos envolvidos refere-se às taxas de degradação que devem ser iguais em ambos os estágios, para que o processo seja eficiente. Caso contrário, se no primeiro estágio o processo for rápido demais, a concentração de ácidos e de gás carbônico eleva-se e o pH cai abaixo de 7,0, assim a fermentação ácida ocorre também no segundo estágio. Portanto, se o segundo estágio ocorrer demasiadamente rápido, evidenciando que muitos microrganismos do primeiro estágio estão presentes no segundo estágio, a produção de metano diminui e se faz necessário introduzir novos microrganismos do segundo estágio para restabelecer o equilíbrio (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

O parâmetro que é frequentemente utilizado para verificar o equilíbrio ecológico em sistemas anaeróbios é a concentração de ácidos graxos voláteis (AGV). Os AGV são produtos intermediários do processo de digestão anaeróbia, provenientes da degradação de carboidratos, proteínas e lipídeos e se caracterizam por serem de baixo peso molecular, como o propionato, o butirato e outros compostos mais reduzidos que o acetato, como os ácidos de cadeias curtas (AQUINO e CHERNICHARO, 2005).

Quando o sistema se apresenta equilibrado, com uma população de bactérias metanogênicas suficiente e em condições favoráveis, os AGV são consumidos logo após serem formados e, portanto, não se acumulam no sistema e o pH permanece neutro. Por outro lado, com o sistema sob condições de estresse e limitações cinéticas dos microrganismos metanogênicos, os AGV são gerados a uma taxa maior do que são consumidos, acumulando-se no meio e causando uma queda no pH, provocando o azedamento do biodigestor e o cessamento da atividade dos microrganismos metanogênicos (CHERNICHARO, 2007).

Dessa forma, os ácidos graxos voláteis (AGV) e a alcalinidade se tornaram importantes indicadores da estabilidade em biodigestores anaeróbios. A acidez volátil, quantificada em “mg de ácido acético por litro”, indica a concentração de ácidos e mede a capacidade do processo fermentativo anaeróbio em resistir à elevação do pH quando uma base é adicionada. A alcalinidade total, quantificada em “mg de carbonato de cálcio por litro”, indica a concentração de álcalis participantes na fermentação e mede a capacidade do sistema em resistir ao abaixamento do pH quando da adição de ácidos. Os dois indicadores são os mais importantes para o monitoramento de processos anaeróbios (AMANI et al., 2010).

Portanto, é necessário dosar a quantidade de substrato a ser adicionada ao biodigestor, na qual a referência estimativa é a relação de ácidos voláteis versus alcalinidade (AV/AT) existente na fermentação, cujo valor, conforme Sánchez et al. (2005), deve ficar entre 0,1 a 0,5 para que o sistema mantenha o equilíbrio nas reações de produção e de consumo dos compostos.

A DA de RA é um processo complexo que deve simultaneamente digerir carboidratos, proteínas e gorduras em um sistema de simples estágio.

O processo é influenciado estreitamente por diversos parâmetros-chave, como temperatura, pH, concentração de AGV, de amônia, de nutrientes, entre outros. É extremamente importante manter os parâmetros-chave em níveis apropriados por um longo tempo de operação (ZHANG et al., 2014).

Neste contexto, o presente estudo objetivou avaliar a eficiência de um protótipo de biodigestor anaeróbio operado em modo de alimentação semi-contínuo com os resíduos alimentares.

Materiais e Métodos

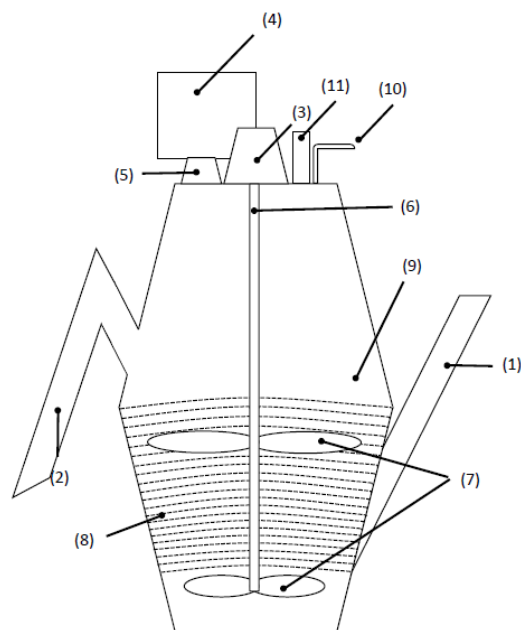
O presente estudo foi desenvolvido na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE (campus Cascavel – PR), utilizando um protótipo de biodigestor anaeróbio para a conversão de RA em biogás. Esta parte do estudo foi desenvolvida de forma exploratória para melhor compreender a máxima eficiência do protótipo de biodigestor anaeróbio, de acordo com as cargas orgânica e volumétrica aplicadas.

O protótipo de biodigestor anaeróbio, com volume de 408 L, foi projetado e montado pela empresa BioKöhler® Biodigestores, do município de Marechal Cândido Rondon – PR.

A fabricante disponibilizou o protótipo com câmara de digestão, serpentina interna de aquecimento, balão vinil de 1m³ para o armazenamento do biogás, agitador mecânico com temporizador e painel elétrico de controle.

Na UNIOESTE, o biodigestor foi complementado com “boiler” de aquecimento da água de recirculação pela serpentina interna do biodigestor para manutenção da temperatura; também foi instalado um manômetro em tubo tipo U para monitorar a pressão interna do biodigestor.

Figura 1. Esquema do protótipo de biodigestor anaeróbio.



Legenda: 1 – Entrada; 2 – Saída; 3 – Motor elétrico; 4- Painel de controle; 5 – Sensor de temperatura; 6 – Eixo de rotação; 7 – Pás de agitação; 8 – Serpentina interna de aquecimento; 9 – Câmara de digestão; 10 – Biogás; 11 – Manômetro.

Fonte: Autores (2021)

O aquecimento da água foi feito com três termostatos de potência 200 W, buscando manter a temperatura interna do biodigestor constante em $29 \pm 0,5^\circ\text{C}$ e impedir que as oscilações de temperatura ambiente interferissem no processo de digestão.

Conforme apresentado na Figura 1, o eixo vertical de rotação era dotado de quatro pás de agitação, duas no fundo e duas na altura intermediária do biodigestor. O eixo também era equipado com um redutor de velocidade conectado ao motor elétrico com potência de 24V, acionado por um temporizador durante 15 minutos a cada hora, totalizando vinte acionamentos do agitador por dia, a uma velocidade de 30 rpm, de modo a promover a homogeneidade da biomassa.

As serpentinas internas serviam para conduzir a água aquecida do boiler para dentro do biodigestor promovendo a troca de calor da água com a biomassa e manter a temperatura interna constante à $29 \pm 0,5^\circ\text{C}$. A eletrobomba era responsável pela recirculação da água e acionadas pelo painel de controle, integrado ao sensor de temperatura, que acionava a recirculação quando o sensor de temperatura média temperaturas abaixo de $28,5^\circ\text{C}$ e desativada quando o sensor atingia $29,5^\circ\text{C}$.

Partida do protótipo de biodigestor anaeróbio e frequência de alimentação

A partida do processo anaeróbio no biodigestor protótipo foi realizada com o auxílio do efluente de um biodigestor anaeróbio em operação, alimentado com dejetos da suinocultura de uma cooperativa da região. A inoculação se deu na proporção de 1:210:195 (v/v) de substrato (resíduos alimentares), inoculo e água, respectivamente. Este percentual de 50% de inoculo foi ligeiramente superior ao recomendado por Foster-Carneiro

et al. (2008), que sugerem que o percentual de 30% do volume útil do digestor deva ser preenchido com inoculo. Portanto, ocorreu a suplementação com água de modo a reduzir o teor de sólidos na partida do protótipo de biodigestor anaeróbio. A partir disso, arbitrou-se uma baixa carga orgânica e monitorou-se o pH e a relação AV/AT, para orientação quanto ao nível da carga a ser aplicada. A partir dos resultados obtidos, foi-se variando a frequência e intensidade da carga orgânica a ser adicionada para o desenvolvimento e adaptação dos microrganismos presente nos compostos em fermentação. Se os resultados do pH (próximo de 7) e relação acidez volátil e alcalinidade total (AV/AT) (entre 0,1 e 0,5) apresentavam-se adequados (SÁNCHEZ et al., 2005), a carga era continuamente aumentada; caso contrário, reduzia-se a carga.

O biodigestor recebeu alimentações diárias (exceto aos sábados e domingos) de substrato com as mesmas características, variando-se apenas os volumes que foram gradativamente aumentados até atingir a estabilização do processo, quando foi possível obter os maiores teores de metano. Foram necessárias 5 etapas para alcançar a capacidade ideal de alimentação do biodigestor bem como para manter os níveis dos parâmetros chave em equilíbrio. Os indicadores para o aumento diário de carga orgânica e de estabilidade do processo foram o pH, a relação AV/AT e a produção de biogás. A primeira etapa se deu em 56 dias, a segunda etapa durou 103 dias, a terceira etapa durou 141 dias, a quarta etapa de recuperação do biodigestor durou 35 dias e a quinta e última etapa durou 163 dias, quando foi alcançada a estabilidade na operação plena do biodigestor e então os resultados da Tabela 2 foram coletados por um período de 51 dias. Ao todo, o reator operou por aproximadamente 549 dias.

Os resíduos alimentares utilizados no estudo foram provenientes de um restaurante popular, do qual segregavam-se ossos, plásticos e outros materiais inertes, restando apenas cereais, vegetais, massas, legumes, carnes e embutidos na mistura. A mistura então era processada em um liquidificador industrial e posteriormente congelada à -18°C. Para o processo de alimentação do biodigestor, primeiramente efetuou-se o descongelamento dos resíduos alimentares, nos respectivos dias de alimentação (segunda a sexta-feira, exceto aos finais de semana devido à atividade do restaurante), nas quantidades necessárias para alimentar o biodigestor e coletar amostras às análises físico-químicas de entrada.

Após o biodigestor ser alimentado, no duto de saída (Figura 1) era expurgada uma quantidade próxima do substrato inserido, coletando-se uma amostra e armazenando-a para ser submetida às análises de caracterizações físico-químicas de saída ou a submetia aos ensaios pertinentes à estabilidade do biodigestor.

Análises físico-químicas e produção de biogás

Para controle da estabilidade e identificação da máxima capacidade do protótipo de biodigestor anaeróbio, foram realizadas as análises físico-químicas três vezes ao longo das semanas. As análises realizadas foram pH, relação AV/AT, sólidos (ST e SV), relação C/N e

demanda química de oxigênio (DQO) conforme a metodologia APHA (2005).

A medição da vazão do biogás foi realizada por meio de um medidor de gás natural fabricado pela LAD Indústria® modelo G1, com vazão horária máxima e mínima variando em 2,30 e 0,02 m³, respectivamente.

Resultados e Discussão

As características do RA utilizado no experimento estão apresentadas na Tabela 1, juntamente com os dados obtidos por diferentes autores que também utilizaram RA como substrato para a produção de biogás. Todos os dados foram validados estatisticamente, apresentando coeficiente de variação inferior a 0,5%.

Tabela 1. Caracterização comparativa do resíduo alimentar

Parâmetro	Zhang et al. (2007)	Zhang et al. (2011)	Este estudo
pH	-	6,5	5,98
Sólidos Totais – ST	30,90%	18,10%	15,28%
Sólidos Voláteis - SV	26,35%	17,10%	13,02%
ST/SV	85,30%	94%	85,21%
Carbono total - C	46,78%	46,67%	44,40%
Nitrogênio total - N	3,16%	3,54%	2,36%
Relação C/N	14,8	13,2	18,81

Fonte: Autores (2021)

Segundo Zhang et al. (2007), não existem variações significativas entre o efluente e afluente do processo de DA quanto à concentração de nutrientes. De fato, os microrganismos consomem nutrientes em seus respectivos metabolismos, ainda assim, os micros e macros nutrientes permaneceram em níveis bastante semelhantes. Neste estudo, obteve-se um pH de 5,98 para os resíduos alimentares, valores dentro dos limites encontrados na literatura, assim como Zhang et al. (2011) encontraram o valor de 6,5 para os resíduos alimentares, valores ligeiramente ácidos que podem inibir a atividade dos microrganismos.

A concentração de sólidos voláteis dos resíduos alimentares foi de 85,21% evidenciando, portanto, a elevada presença de materiais orgânicos passíveis de serem convertidos em metano por meio da ação da comunidade microbiana anaeróbia. O valor de SV obtido neste estudo foi próximo ao obtido por Zhang et al. (2007) de 85,30% e ao obtido por Zhang et al. (2011) de 94%.

A relação C/N ao valor de 15,72 demonstra a viabilidade do RA ser utilizado na DA, dado que a relação C/N é referente à capacidade de digestão, em que uma relação adequada para o desenvolvimento dos microrganismos estaria numa faixa de 20 a 30 (VERNA, 2002). Ainda assim, nota-se que o valor obtido neste estudo está próximo aos encontrados na literatura para resíduos alimentares, conforme apresentado na Tabela 1. Isso se deve às concentrações de carbono e nitrogênio, que foram bastante similares às encontradas por Zhang et al. (2007) e Zhang et al. (2011).

Os resíduos alimentares são considerados substratos orgânicos promissores para a DA, devido ao alto potencial na produção de metano (NEVES, OLIVEIRA e ALVES, 2006).

No entanto, inibições podem ocorrer ao se biodigerir unicamente resíduos alimentares por longo tempo de operação. As razões para a inibição são o desbalanceamento de nutrientes na fermentação, isto é, os elementos traço (Zn, Fe, Mo, etc.) são insuficientes, os macronutrientes (Na, K, etc.) são excessivos (EL-MASHAD e ZHANG, 2010; ZHANG et al., 2011) e a relação C/N dos restos de alimentos, ao valor de 18,81, está dentro dos limites compatíveis (SOSNOWSKI et al., 2003).

Xu e Li (2012) mencionam vantagens da codigestão quando comparadas às digestões anaeróbias conduzidas com substrato único (monodigestão). Zhang et al. (2013) encontraram que a codigestão de resíduos alimentares com dejetos bovinos não somente aumenta a capacidade de carga orgânica, mas também promove o rendimento de metano em digestão anaeróbia semi-continua. A alta capacidade tampão da codigestão foi observada devido ao aumento da concentração de amônia dos dejetos.

Além da amônia, a alcalinidade de bicarbonatos é fundamental na DA, pois é um parametro que possibilita a neutralização dos ácidos formados durante o processo e o tamponamento do pH, em eventuais acúmulos de ácidos voláteis no biodigestor (CHERNICHARO, 2007).

A composição das substâncias orgânicas, tais como proteínas e carboidratos, constituem-se normalmente da parte mais facilmente disponível aos microrganismos, por outro lado, compostos lignocelulósicos caracterizam-se por serem de difícil degradação.

Conforme a literatura, resíduos alimentares são ricos em lipídios, com cerca de 5,0 g.L⁻¹ (ZHANG et al., 2013). No entanto, os lipídeos são de difícil biodegradação, sendo considerados fator limitante nestes processos. Alguns pesquisadores atribuem a falência da DA de RA a alta concentração de lipídeos (NEVES, OLIVEIRA e ALVES, 2006; OH e MARTIN, 2010).

Partida do protótipo de biodigestor anaeróbio

Promoveu-se a DA dos resíduos alimentares em um protótipo de biodigestor anaeróbio, projetado e construído especificamente para operar a DA de resíduos alimentares, bastante similar ao biodigestor confeccionado por Perin et al. (2020). No entanto, devido a este protótipo de biodigestor anaeróbio ser um modelo novo, o qual não havia sido testado anteriormente, houve a necessidade de identificar qual carga orgânica seria a mais adequada para o sistema.

Assim, desde a partida do biodigestor foram necessárias 5 etapas para estabilizá-lo, devido a instabilidades encontradas no sistema por sub ou superutilização relacionada à carga orgânica adicionada.

Cabe salientar que o parâmetro carga orgânica volumétrica é um fator fundamental a ser estudado em biodigestores anaeróbios, dado que a eficiência do sistema está atrelada à máxima capacidade de carga orgânica que o biodigestor pode suportar. Por outro lado, a aplicação de cargas demasiadamente elevadas nos biodigestores anaeróbios leva ao acúmulo de ácidos graxos voláteis no meio.

Por consequência, instabilidades no processo e eventuais falhas no sistema podem ocorrer (FERREIRA, 2015). Sob esta perspectiva, buscou-se encontrar a melhor carga orgânica volumétrica que o protótipo de biodigestor pudesse suportar, sendo incrementadas progressivamente, de modo a obter a real eficiência e estabilidade do sistema.

Primeira etapa de estabilização

A partida da fermentação no biodigestor protótipo deu-se simultaneamente com a adição de água e inóculo. Foi iniciada a alimentação do biodigestor com a carga orgânica de 0,30 gSVL⁻¹rd⁻¹. Essa carga, aumentada gradativamente por 56 dias, atingiu 1,18 gSVL⁻¹rd⁻¹, porém, o pH caiu de 7,25 para 5,90. Segundo Li et al. (2010), a queda pode ser atribuída à alta taxa de hidrólise e o acúmulo de ácidos graxos voláteis que cessam a produção de biogás com o pH abaixo de 6,5. Com um pH de 5,8, o teor de metano era de 50% e o de gás carbônico 47%, resultado típico de fermentações sob “stress” de ácidos graxos voláteis.

Para corrigir o pH em intervalo adequado à fermentação anaeróbia, de 6,5 a 7,2, (APPELS et al., 2011), foi adicionado 627 g de cal hidratada (1,54 g de cal por litro de substrato em fermentação) diluída em água. Um dia após a adição da cal, o pH elevou-se para 7,5 retomando as condições favoráveis ao desenvolvimento microbiano.

Segunda etapa de estabilização

Após a correção do pH, gradativamente retomou-se o aumento de carga objetivando, pela segunda vez, atingir o limite de estabilidade, referenciada na relação acidez/alcalinidade e atingir o período de coleta de dados. O aumento de carga ocorreu no período de 90 dias; após esse período, repetiu-se a carga para sair do efeito de seu aumento, quando é necessário operar o biodigestor, no mínimo, por um tempo igual ao tempo de retenção hidráulica (TRH), que nesta fase estava em 103 dias.

Ao final deste período, com a relação AV/AT igual a 0,04, constatou-se que o biodigestor estava subutilizado, ou seja, a carga orgânica aplicada estava aquém de sua capacidade de digestão, uma vez a relação adequada de AV/AT para o processo de DA está numa faixa de 0,1 a 0,5, e valores muito abaixo desse limite representam baixa produção de ácidos orgânicos no processo, os quais são substrato das metanogênicas, implicando em menores produções de metano.

Terceira etapa de estabilização

Iniciou-se o novo período de aumento de carga, com o objetivo de utilizar a capacidade plena do biodigestor, que se estendeu por 60 dias, quando apresentou uma relação AV/AT de 0,25. Este valor é considerado adequado em relação à estabilidade na produção e consumo de ácidos na fermentação anaeróbia (SÁNCHEZ et al., 2005). Conforme os autores, o valor da relação deve situar-se entre 0,1 e 0,5 (AMANI et al., 2010; CABBAI et al., 2013).

Aguardando sair da influência do aumento de carga, manteve-se a alimentação com carga orgânica estimada em 1,27 gSVL⁻¹.rd⁻¹ por cerca de 60 dias. Após, iniciou-se o período de coleta de amostras para avaliar o desempenho do biodigestor. Entretanto, 30 dias depois, com um pH de 6,84, a relação AV/AT apresentou o valor de 0,9, sinalizando um eminente colapso da fermentação (SILVA, 1977; SÁNCHEZ et al., 2005).

Imediatamente, suspendeu-se a alimentação para evitar a queda do pH e falência do processo. Concluiu-se que o biodigestor não apresentava condições de digerir a referida carga e que nova tentativa deveria ser feita para adequá-lo a uma carga factível de digestão.

Quarta etapa de estabilização

Após identificar o iminente colapso do biodigestor, para manter a atividade microbiana, o biodigestor foi alimentado com menor volume e em apenas um dia por semana por cerca de um mês. Além da redução da frequência, também houve redução na carga orgânica, traduzida em menor volume de alimentação diária. Para acompanhar a resposta da fermentação nestas condições, obtiveram-se alguns valores da relação AV/AT neste período, mostrada na Figura 2. Foram feitas 8 observações, realizadas arbitrariamente ao longo das semanas, durante o período de recuperação. A frequência de alimentação foi reduzida em 86%, restrita a quatro operações. A estratégia adotada promoveu uma redução de 31% na carga orgânica adicionada, promovendo a elevação na alcalinidade no biodigestor, conforme apresentada na Figura 2. Nos 35 dias corridos do período de recuperação, a relação AV/AT reduziu-se de 0,97 para 0,39, retomando as condições de equilíbrio seguro, sinalizada pela variável. A rotina de alimentação do biodigestor foi de segunda a sexta feira.

Etapa final de estabilização

Com uma relação AV/AT de 0,36, iniciou-se um novo período de alimentação regular, aumentando-se gradativamente o volume de alimentação, considerando a

razão entre os ácidos e a capacidade tampão da biomassa em fermentação.

O objetivo foi atingir a estabilização sustentável e explorar a capacidade máxima do biodigestor em digerir os resíduos alimentares.

A estabilidade do biodigestor foi atingida 90 dias depois, com uma carga orgânica em DQO de 0,82 gL⁻¹.rd⁻¹ e em sólidos voláteis de 0,80 gL⁻¹.rd⁻¹. Noventa dias foi o tempo necessário para o biodigestor sair do efeito de elevação da carga orgânica e iniciar o período de coleta de dados. Neste período, a fermentação manteve uma relação AV/AT média de 0,37. O longo período aguardado para o início da coleta de dados deveu-se ao elevado teor de sólidos totais do substrato adicionado, que fez com que a alimentação diária fosse de apenas 2,5 L, para um biodigestor de 408 L, resultando em TRH de 163 dias. A partir do momento em que se alcançou a estabilidade do biodigestor e constatou-se que o mesmo estava sendo alimentado com uma carga orgânica volumétrica adequada, deu-se início à fase de coleta de dados e análises, que resultou nos dados apresentados na Tabela 2.

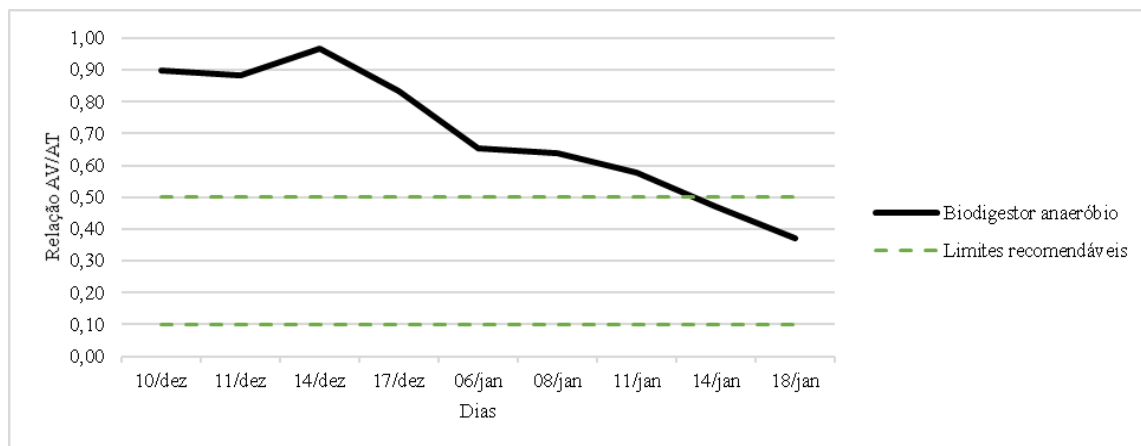
Como pode ser observado na Tabela 2, a alimentação do protótipo de biodigestor anaeróbia se deu 5 dias por semana, de segunda a sexta, que correspondem aos dias de funcionamento do restaurante popular que forneceu os resíduos alimentares para este estudo, portanto, dias que seriam gerados os resíduos.

Tabela 2. Caracterizações dos parâmetros do protótipo de biodigestor anaeróbio.

Parâmetro	Valor	Eficiência
Alimentação (b.u.) ^l	1,125	-
ST entrada (%)	15,285	87%
ST saída (%)	1,950	
pH saída	8,020	-
Relação AV/AT	0,491	-
Temperatura (°C)	29,433	-
DQO entrada (g.L ⁻¹)	129,760	83,34%
DQO saída (g.L ⁻¹)	21,778	
SV entrada (g.L ⁻¹)	130,293	90,22%
SV saída (g.L ⁻¹)	12,704	
Biogás (L.d ⁻¹)	220,470	-
CH ₄ (L.d ⁻¹)	130,000	-

Legenda: I: base úmida. Fonte: Autores (2021)

Figura 2. Relação AV/AT durante o período de estabilização do protótipo de biodigestor anaeróbio.



Fonte: Autores (2021)

A capacidade ótima do protótipo de biodigestor anaeróbio foi encontrada quando a alimentação foi de 1,125 kg de resíduo alimentar por dia, massa de resíduos que correspondem a 15,28% de SV e 129,760 g.L⁻¹ de DQO.

Essa elevada carga é devido às características do resíduo alimentar brasileiro, que contém uma diversidade de materiais complexos, como hidrocarbonetos, proteínas e lipídeos (SILVA, 2015).

Os percentuais de redução contaminante obtidos pelo protótipo de biodigestor anaeróbio, descritos em termos de SV e DQO, de 83,34% e 90,22%, respectivamente, apontam uma excelente performance durante o processo de digestão anaeróbia se comparado aos resultados obtidos por Ratanatamskul et al. (2014), que obtiveram 68,93% e 73,71% de redução em SV e DQO, respectivamente, que utilizaram de um protótipo de biodigestor anaeróbio mesofílico de duas fases com capacidade de 1.000 L para a digestão ácida e de 2.500 L para a digestão metanogênica. Perin et al. (2020) obtiveram reduções de SV de 83% e produção específica de metano de 0,47 L CH₄.gSV⁻¹ ao conduzir a digestão anaeróbia de resíduos alimentares em dois reatores piloto de 500 L cada.

Além disso, a produção de biogás e de metano encontradas neste experimento foram satisfatórias, apresentando uma produção volumétrica de metano a partir da DQO reduzida de 0,506 ± 0,11 L CH₄.gDQOr⁻¹ e a partir dos SV reduzidos de 0,444 ± 0,02 L CH₄.gSVr⁻¹. Os valores também foram superiores aos encontrados por Ratanatamskul et al. (2014), que obtiveram valores de 0,077, 0,099 e 0,118 62 L CH₄.gDQOr⁻¹ e de 0,237, 0,379 e 0,457 L CH₄.gSVr⁻¹ para os TRH de 27, 22 e 19 dias, respectivamente, operando um protótipo de biodigestor anaeróbio alimentado com resíduos alimentares. Santos (2015) ao biodigerir resíduos sólidos de refeição de restaurante, obteve potencial máximo de 0,590 L CH₄.gSVr⁻¹.

Conclusão

Os resíduos alimentares mostraram-se promissores à produção de metano, devido a sua grande disponibilidade bem como por suas características biodegradáveis, verificadas no processo de digestão anaeróbia. Os resíduos alimentares apresentaram, em média, teor de sólidos voláteis na faixa de 85,21% e a relação C/N de 15,72, os quais, conforme a literatura, são favoráveis ao processo de digestão anaeróbia. No entanto, constataram-se complicações ao digerir os resíduos alimentares isoladamente, representado pelas oscilações no parâmetro AV/AT, que indicou instabilidades durante o processo de digestão anaeróbia no biodigestor protótipo.

O protótipo de biodigestor anaeróbio foi eficiente na remoção de matéria orgânica dos resíduos alimentares, na ordem de 82,34 % na DQO e de 90,22 em SV. No entanto, foram necessárias algumas etapas até encontrar a carga orgânica adequada de alimentação do biodigestor protótipo, representada pela estabilidade baseada na relação AV/AT, a qual apresentou o valor médio de 0,49.

Conclui-se, portanto, que o protótipo de biodigestor anaeróbio é eficiente para a conversão dos

resíduos alimentares em metano, sendo aconselhável o uso de um ou mais cosubstratos, de modo a aprimorar a capacidade tampão e a disponibilidade de nutrientes para suportar o crescimento dos microrganismos, principalmente os metanogênicos. Sugere-se intensificação nos estudos em reatores protótipos variando a frequência de agitação e o teor de sólidos do substrato.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à BioKöhler® Biodigestores pela contribuição com o protótipo de biodigestor anaeróbio e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa, apoios fundamentais para viabilização deste trabalho.

Contribuição dos autores

Os autores desse artigo declaram que contribuíram de forma igualitária na sua elaboração.

Referências

- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZAS PÚBLICAS E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, São Paulo. 2019.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZAS PÚBLICAS E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, São Paulo. 2020.
- AMANI, T.; NOSRATI, M.; SREEKRISHNAN, T.R. Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects - a review. **Environmental Reviews**, n. 18, p. 255-278, 2010.
<https://doi.org/10.1139/A10-011>
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 21.ed. Washington. 2005.
- APPELS, L.; ASSCHEB, A. V.; WILLEMSB, K.; DEGRÈVEA, J.; IMPEA, J. V.; DEWIL, R. Peracetic acid oxidation as an alternative pretreatment for the anaerobic digestion of waste activated sludge. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 5, p. 4124-4130, 2011.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.070>
- AQUINO, S.F.de.; CHERNICHARO, C.A.L. Build up volatile fatty acids (VFA) in anaerobic reactors under stress conditions: causes and control strategies. **Eng. Sanit. Ambient**, v. 10, n. 2, p. 152-161, 2005.
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000200009>
- BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, ago., 2010.
- CABBAI, V.; BALLICO, M.; ANEGGI, E.; GOI, D. BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge. **Waste management**, v. 33, n. 7, p. 1626-1632, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.03.020>
- CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v. 5, n. 2, 2007, 380 p.
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000300001>

- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: An introduction**. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2008, 450p. <https://doi.org/10.1002/9783527621705>
- EL-MASHAD, H.M.; ZHANG, R. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 4021-4028, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.027>
- FERREIRA, B.O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2015, 124p.
- FOSTER-CARNEIRO, T.; PÉREZ, M.; ROMERO, L. I. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactor treating food waste. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 6994-7002, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.018>
- LI, R.P.; WANG, K.S.; LI, X.J.; PANG, Y.Z. Characteristic and anaerobic digestion performances of kitchen wastes. **Renewable Energy**, v. 28, p. 76-80, 2010.
- NEVES, L.; OLIVEIRA, R.; ALVES, M.M. Anaerobic co-digestion of coffee waste and sewage sludge. **Waste Management** v. 26, n. 2, p. 176-181, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.022>
- OH, S.T.; MARTIN, A.D. Long chain fatty acids degradation in anaerobic digester: Thermodynamic equilibrium consideration. **Process Biochemistry**, v. 45, n. 3, p. 335-345, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2009.10.006>
- PERIN, J. K. H.; BORTH, P. L. B.; TORRECILHAS, A. R.; CUNHA, L. S. da; KURODA, E. K.; FERNANDES, F. Optimization of methane production parameters during anaerobic co-digestion of food waste and garden waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 123-130, 2020.
- PITK, P.; KARAPAJU, P.; PALATSI, J.; AFFES, R.; VILU R. Co-digestion of sewage sludge and sterilized solid slaughterhouse waste: Methane production efficiency and process limitations. **Bioresource Technology**, v. 134, p. 227-232, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.029>
- RATANATAMSKUL, C.; ONNUM, G.; YAMAMOTO, K. A prototype single-stage anaerobic digester for co-digestion of food waste and sewage sludge from high-rise building for on-site biogas production. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 95, p. 176-180, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.010>
- SÁNCHEZ, E.; BORJA, R.; TRAVIESO, L.; MARTÍN, A.; COLMENAREJO, M.F. Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary up flow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 3, p. 335-344, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.04.003>
- SANTOS, V. G. **Tratamento de resíduos sólidos de refeições de restaurante e produção de biogás em reator anaeróbio em escala piloto**. 2015. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Fundação Universidade Regional de Blumenau. Blumenau, SC. 2015.
- SILVA, G.B. **Avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir do resíduo do leite**. 2015. 18f. TCC (Técnico em Química). Centro Universitário Univates, Lajeado, RS. 2015.
- SILVA, M.O.S.A. 1977. **Análises físico-químicas para controle das estações de tratamento de esgotos**. São Paulo: CETESB, 226p.
- SOSNOWSKI P.; WIECZOREK A.; LEDAKOWICZ S. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. **Advances in Environmental Research**, v. 7, n. 3, p. 609-616, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00049-7)
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues**. New York: McGraw-Hill, 1993, 978p.
- VERMA, S. **Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes**. New York: Columbia University, 2002, 50p.
- WOON, K.S.; LO, I.M.C. A proposed framework of food waste collection and recycling for renewable biogas fuel production in Hong Kong. **Waste Management**, v. 47, p. 3-10, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.022>
- XU, F.; LI, Y. Solid-state co-digestion of expired dog food and corn stover for methane production. **Bioresource Technology**, v.118, p. 219-226, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.102>
- ZAGO, V. C. P.; BARROS, R. T. de V. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 21, p. 219-228, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019181376>
- ZANDONADI, H.S.; MAURÍCIO, A.A. Avaliação do índice de restrição alimentar, de refeições consumidas por trabalhadores da construção civil no município de Cuiabá, MT. **Revista Higiene Alimentar**. São Paulo, v.26, n. 206/207, p. 64-70, 2012.
- ZHANG, C.; SU, H.; BAYAENS, J.; TAN, T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 383-392, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>
- ZHANG, R.; EL-MASHAD, H.M.; HARTMAN, K.; WANG, F.; LIU, G.; CHOATE, C.; GAMBLE, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 929-935, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.039>
- ZHANG, C.; SU, H.; TAN, T. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid-liquid system. **Bioresource Technology**, v. 145, p. 10-13, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.030>
- ZHANG, L.; LEEB, Y-W.; JAHNGA, D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 8, p. 5048-5059, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.082>