

Produção de biogás a partir da água residual de mandioca (manipueira) utilizando diferentes métodos e inóculos

MARTINS, Diego Fernando
KEWITZ, Felipe Senna
MAZZONETTO, Alexandre Witier
ALONSO, Luis Felipe Toro

Resumo

O presente trabalho foi motivado pela preocupação ambiental acerca dos transtornos causados por certo efluente agroindustrial, com potencial para geração de energia. A agroindústria tem um papel importante no cenário nacional brasileiro. Com o crescimento de seus negócios, aumentam os resíduos produzidos, e a biodigestão anaeróbia pode ser uma alternativa para tratar efluentes orgânicos. A energia elétrica brasileira é uma das mais caras da América do Sul, sendo muitas vezes o dobro do valor da Argentina e quase o triplo do valor da Paraguai. Buscou-se avaliar a geração de biogás a partir da manipueira, analisando a influência de inóculos e correção do pH na biodigestão anaeróbia, dando lugar ao tratamento biológico de tal efluente, resultando em um biofertilizante estabilizado. Foram montados seis biodigestores (de cinco litros cada) com a manipueira, sendo que quatro deles receberam correção de pH, além da utilização de dois diferentes inóculos (de origem bovina e suína). Os biodigestores foram acondicionados para que a biodigestão anaeróbia ocorresse de maneira satisfatória por cinquenta dias (tempo de retenção hidráulica). Os resultados foram comparados com as análises iniciais realizadas na manipueira bruta (antes da biodigestão anaeróbia) para comprovar a eficácia do processo. O procedimento realizado se mostrou bastante satisfatório quando utilizado de inóculo bovino e correção do pH, resultando em geração de biogás e um biofertilizante estabilizado, com características primárias bastante interessantes.

Palavras chave: biodigestão anaeróbia, efluente agroindustrial, correção de pH, tempo de retenção hidráulica, biofertilizante.

Abstract

The present paper was motivated by the environmental concern about the damage caused by certain agro-industrial effluents with energy generation potential. The agro-industry plays an important role in the Brazilian national scenario. With the growth of its business, the waste produced increases, and anaerobic biodigestion can be an alternative for treating organic effluents. Brazilian electricity is one of the most expensive in South America, often twice the value found in Argentina and almost triple the value in Paraguay. We sought to evaluate the generation of biogas from manipueira (cassava flour wastewater), analyzing the influence of inocula and pH correction on anaerobic biodigestion, giving rise to the biological treatment of such effluent, resulting in a stabilized biofertilizer. Six biodigesters (of five liters each) were assembled with the addition of manipueira, four of which received pH correction, in addition to the use of two different inoculums (bovine and swine origin). The biodigesters were encased so the anaerobic digestion could take place satisfactorily for fifty days (hydraulic retention time). The results were compared with the initial analyses of raw manipueira (before the anaerobic biodigestion) to prove the efficiency of the process. The procedure proved to be quite satisfactory when using the bovine inoculum and pH correction, resulting in the generation of biogas and a stabilized biofertilizer, with very interesting primary characteristics.

Keywords: anaerobic biodigestion, agroindustrial effluent, pH correction, hydraulic retention time, biofertilizer.

Resumen

El presente trabajo fue motivado por la preocupación ambiental por las perturbaciones que ocasiona cierto efluente agroindustrial, con potencial para la generación de energía. La agroindustria juega un papel importante en el escenario nacional brasileño. Con el crecimiento de sus negocios, los residuos producidos aumentan, y la digestión anaeróbica puede ser una alternativa para tratar los efluentes orgánicos. La electricidad brasileña es una de las más caras de América del Sur, a menudo duplica el valor de Argentina y casi triplica el valor de Paraguay. Buscamos evaluar la generación de biogás a partir de manipueira, analizando la influencia del inóculo y la corrección del pH en la biodigestión anaerobia, dando lugar al tratamiento biológico de dicho efluente, resultando en un biofertilizante estabilizado. Se instalaron seis biodigestores (de cinco litros cada uno) con manipueira, cuatro de los cuales recibieron corrección de pH, además del uso de dos inóculos diferentes (bovino y porcino). Los biodigestores se acondicionaron para que la digestión anaeróbica pudiera ocurrir satisfactoriamente durante cincuenta días (tiempo de retención hidráulica). Los resultados fueron comparados con los análisis iniciales realizados sobre la manipueira cruda (antes de la digestión anaeróbica) para probar la efectividad del proceso. El procedimiento realizado resultó bastante satisfactorio al utilizar inóculo bovino y corrección de pH, resultando en la generación de biogás y un biofertilizante estabilizado, con características primarias muy interesantes.

Palabras clave: digestión anaerobia, efluente agroindustrial, corrección de pH, tiempo de retención hidráulica, biofertilizante.

INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente, bem como o impacto ambiental dos resíduos agroindustriais andam juntas. Melhorar a produção e reduzir os custos da produção agroindustrial não deve gerar prejuízo ao meio ambiente. A escolha por rotas e processos mitigadores tem sido cada vez mais um fator decisivo no meio industrial.

A agroindústria tem um papel importante no cenário nacional e, com o crescimento dos negócios, aumentam os resíduos produzidos. A biodigestão anaeróbia pode ser uma alternativa para tratar efluentes orgânicos e, ainda, gerar novos produtos para agroindústria: biofertilizante e biocombustível, que pode alimentar um motorizador ou uma caldeira para produção de vapor.

A energia elétrica brasileira é uma das mais caras da América do Sul, o dobro do valor da Argentina e quase o triplo do valor da Paraguai. Segundo o International Energy Agency (IEA), no ano de 2017, os valores da energia elétrica na Argentina, Brasil e Paraguai eram de US\$ 87,00/MWh, US\$ 200,00/MWh e US\$ 67,00/MWh, respectivamente.

Um exemplo de efluente proveniente da indústria alimentícia é a manipueira: água residual do processamento da mandioca em fábricas farinheiras. Tal dejetos é bastante nocivo ao meio ambiente, por conter além de alta carga de matéria orgânica e ácido cianídrico, tornando o efluente ainda mais perigoso, levando plantas e animais à morte.

Quando tais efluentes são tratados, não são aproveitados na sua totalidade, mas com investimentos relativamente pequenos, poderiam gerar produtos rentáveis, tanto para geração de energia, alimentando a própria indústria ou comercializada para as concessionárias de energia elétrica.

O presente trabalho estuda o uso de um efluente agroindustrial (manipueira), para geração de biogás, um biocombustível que pode ser utilizado na geração de energia elétrica ou térmica. Por consequência, o tratamento de biodigestão anaeróbia proporcionaria um tratamento adequando para o efluente, resultando também em um biofertilizante estabilizado, a ser utilizado na própria agroindústria, reduzindo assim custos com adubação.

1 REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Mandioca e Manipueira

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma raiz originária do Brasil, difundida muito antes da colonização portuguesa e seu nome varia de acordo com as regiões no território nacional: aipim, castelinha, uaipe e macaxeira. A mandioca é um dos alimentos mais consumidos em todo o mundo,

com sua maior demanda nas regiões tropicais, em países menos desenvolvidos e mais populosos. Destaca-se em produção por sua fácil adaptabilidade ao solo e clima, sua rusticidade, e várias utilizações como alimentação humana, animal e industrial (CONAB, 2017).

A manipueira é um líquido obtido no processo de prensagem da mandioca. Esse processo gera um líquido com alta toxicidade e elevado teor de ácido cianídrico, altamente prejudicial à saúde e ao meio ambiente, porém ao se depositar esse líquido em locais de descanso por 15 dias, torna-se uma boa opção e suplemento alimentar para animais e defensivo agrícola (EMBRAPA, 2011).

Em uma indústria farinheira, o volume gerado de manipueira bruta chega a 300 litros por tonelada de mandioca processada, o poder contaminante de tal efluente (apenas de uma tonelada de mandioca processada) pode ser comparado ao esgoto doméstico de cerca de 200 pessoas/dia (BOTELHO et al., 2009).

Os problemas ocasionados pelo grande volume produzido do efluente são diversos e impactam nas atividades econômicas; por vezes, produtores de farinha reduzem suas atividades pela impossibilidade de descarte. Outro problema são os imensos lagos formados no armazenamento da manipueira (SANTOS, 2009). A composição química do efluente pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas e químicas da manipueira

Parâmetro	Teor
Sólidos sedimentáveis (ml L ⁻¹)	17,20
pH	4,08
Nitrogênio (ml L ⁻¹)	980,0
Fósforo (ml L ⁻¹)	740,0
Potássio (ml L ⁻¹)	1970,0
Sódio (ml L ⁻¹)	460,0
Cálcio (ml L ⁻¹)	240,0
Magnésio (ml L ⁻¹)	360,0
Zinco (ml L ⁻¹)	2,60
Cobre (ml L ⁻¹)	2,80
Manganês (ml L ⁻¹)	20,0
Ferro (ml L ⁻¹)	10,0

Fonte: Duarte et al (2011).

1.2 Questões Ambientais Envolvendo a Manipueira

O maior problema da manipueira é seu descarte “*in natura*” no meio ambiente, o rejeito possui altas cargas de ácido cianídrico (HCN). O ácido é altamente volátil e pode trazer riscos ambientais, na maioria das vezes sendo relacionados à morte de animais que o consomem. O responsável pela liberação do ácido cianídrico é a linamarina, que é o β -glicosídeo de acetonacianidrina, que é muito solúvel em água, aumentando a contaminação. Uma tonelada de

raízes mandioca resulta em um poder poluente equivalente à de cerca de 200 pessoas (quando não tratada devidamente). Outro problema encontrado no descarte sem tratamento é a elevada carga orgânica da manipueira, que acaba possibilitando o desenvolvimento de microrganismos facultativos que consomem o oxigênio livre das águas (OLIVEIRA, 2013).

O decreto n.º 8.468/76 (CETESB, 1976) estabelece que efluentes possam ser descartados desde que (entre outros parâmetros pré-estabelecidos) a DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) em 5 dias deve ser de no máximo 60 mg/L, ou que o tratamento para redução da mesma tenha uma eficiência de pelo menos 80%, onde esse último caso acaba beneficiando descartes industriais que, mesmo tratando seus efluentes, estes são lançados com altos valores de DBO no meio ambiente.

A biodegradabilidade do efluente se torna dificultosa por causa dos altos valores de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), onde tais valores para o efluente são de 14.000 a 34.000 mg/L para DBO; e de cerca de 40.000 mg/L para DQO (TSCHOEKE et al., 2017).

1.3 Biofertilizante

O fluido que se encontra no interior dos biodigestores e que é deslocado para fora destes (após o tempo de retenção hidráulica (TRH) preestabelecido) é considerado um biofertilizante. É um produto bioestabilizado, rico em matéria orgânica, nutrientes e umidade. Depois da biodigestão anaeróbia, os dejetos fermentados não são mais poluentes, não competem com as plantas, não tem cheiro desagradável e seus nutrientes são mais facilmente absorvidos (Centro de Produções Técnicas - CTP, 2019).

Embora as quantidades de nutrientes presentes nos biofertilizantes sejam relativamente modestas, apresentam diversas vantagens quando aplicadas adequadamente ao solo: mobilização de nutrientes no solo, liberação de nutrientes em velocidades mais lentas, manutenção da umidade do solo e auxílio na prevenção de erosões (PORTAL DO BIOGÁS, 2013).

1.4 Biogás

Para Quevedo (2016), o biogás é considerado como um dos combustíveis renováveis obtido a partir da digestão anaeróbica, onde em um ambiente sem a presença do oxigênio as bactérias realizam essa transformação. O biogás é encontrado na forma gasosa e composto por cerca de 60% do hidrocarboneto metano (CH₄), 35% de dióxido de carbono (CO₂) e 5% de outros

compostos como hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas e oxigênio. Dependendo das condições de como foi produzido, o biogás pode conter cerca de 40 a 80% de metano. Naturalmente, o biogás é obtido na ocorrência da fermentação em ecossistemas como mares, pântanos, lagos, jazidas de petróleo, aterros sanitários e minas de carvão. De modo geral, as características do biogás podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2. Possíveis percentuais dos componentes do biogás

Gases componentes do Biogás	Percentual
Metano (CH₄)	50% a 75%
Dióxido de carbono (CO₂)	25% a 40%
Hidrogênio (H₂)	1% a 3%
Nitrogênio (N₂)	0,5% a 2,5%
Oxigênio (O₂)	0,1% a 1%
Gás Sulfídrico (H₂S)	0,1% a 0,5%
Amônio (NH₃)	0,1% a 0,5%
Monóxido de Carbono (CO)	0% a 0,1%
Água (H₂O)	Variável

Fonte: Lima & Passamani (2012).

A energia produzida a partir do biogás entrou recentemente na fase de maturidade. Ainda que seus números absolutos sejam pequenos, a capacidade instalada tem crescido substancialmente. Em 2016, o Brasil alcançou quase 120 MW de capacidade instalada de geração elétrica a partir de biogás, o que é um volume seis vezes superior ao registrado em 2007, sendo que 95% desse valor se referem às plantas que utilizam resíduos sólidos urbanos (RSU). Isso demonstra que o biogás de resíduos urbanos já é uma realidade e deve continuar crescendo (BNDES, 2018).

Há alguns anos, o segmento de obtenção de biogás a no Brasil praticamente não existia. O país tem pouca tradição na produção e utilização de biogás; comparando-se ao restante do mundo, a participação do biogás como fonte energia é de 0,05% aproximando-se a energia solar. No processo de obtenção de biogás também se tem como subproduto o biofertilizante, sendo este biologicamente estabilizado. De 2000 a 2015, cresceu 87% a demanda de fertilizante no país, onde se aumentou a produtividade dos grãos em 150%. O Brasil em uma grande demanda de fertilizantes, onde do total utilizado no país, 75% acaba sendo importado. Somente com os resíduos provenientes das cadeias de avicultura, suinocultura e a produção de cana-de-açúcar, há potencial de geração de 14% de toda demanda de biofertilizante do País. Isso equivale a um mercado anual de US\$ 1 bilhão (DALLACORTE, 2018).

1.5 Fases da Degradação

O processo de biodigestão anaeróbia passa obrigatoriamente por quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese; sendo o biogás produzido apenas na última etapa. Na hidrólise, as moléculas complexas (carboidratos, proteínas e gorduras) são quebradas em moléculas mais simples (aminoácidos, açúcares e ácidos graxos) por um grupo específico de bactérias. Existem diversos tipos de hidrólise, que variam de acordo com a matéria orgânica utilizada. Tal processo é fundamental para se dar início ao processo de biodigestão (ARAÚJO, 2017).

Na etapa de acidogênese, as moléculas provenientes da hidrólise são transportadas para o meio reacional, onde então serão transformadas em ácidos graxos voláteis, dióxido de carbono e gás hidrogênio. A formação desses produtos depende efetivamente da concentração de hidrogênio, a concentração deste deve ser baixa para ser mais rentável (CASTRO & MATEUS, 2016).

A terceira fase é compreendida pela agetogênese, onde os produtos gerados na fase anterior (ácidos orgânicos) são oxidados em substratos para os microrganismos metanogênicos, que correspondem à fase posterior a esse processo da biodigestão anaeróbia (MATOS, 2016).

Por fim, na metanogênese, o ácido etanóico, o dióxido de carbono e o hidrogênio são convertidos pelas bactérias metanogênicas em metano e gás carbônico. Tais bactérias são divididas em acetoclásticas e hidrogenotróficas. As acetoclásticas convertem o acetato em metano através da quebra, sendo responsável por 70% do metano produzido. Já as hidrogenotróficas, fazem a redução do gás carbônico pelo gás hidrogênio, formando assim 30% do metano produzido no processo (CASTRO & MATEUS, 2016).

1.6 Biodigestores por Batelada

Os biodigestores são equipamentos relativamente simples, classificados de acordo com sua construção e tipo de operação. Os de sistema contínuo, onde os biodigestores são alimentados periodicamente (contínuo); e por batelada (intermitente), onde o sistema é fechado e alimentado uma única vez (GONÇALVES, 2018).

Biodigestores por batelada são sistemas simples e de fácil operação. Podem ser constituídos por apenas um reator ou por vários ligados em série. O substrato é adicionado uma única vez no reator, mantendo-se no seu interior por vários dias (tempo que deve ser previamente definido, de acordo com o desejado). Depois de terminado o processo, o biodigestor então é aberto e tem-se o lodo (ou biofertilizante) resultante, que é retirado. Após isso, se dá novamente o processo, abastecendo-o com o substrato novo (JUNQUEIRA, 2014).

Os reatores podem ser dispostos horizontalmente ou verticalmente; devem ser enterrados para melhor controle da temperatura (tendo menores variações) e devem, como qualquer outro biodigestor anaeróbico, estar devidamente vedado. Além do mais, os substratos utilizados nesses tipos de biodigestores podem conter restos palhas e areia, proveniente dos manejos das culturas (XAVIER, 2010).

1.7 Inoculação

A inoculação, nada mais é que, a introdução de microrganismos em um meio, seja ele qual for. No caso da utilização em biodigestores anaeróbicos, um material é previamente preparado, para que as bactérias responsáveis pela produção do biogás estejam ativas (bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas). Diversos são os manejos utilizados para se obter uma boa produção de biogás em reatores anaeróbicos. Um dos principais é a utilização de inóculos (material contendo carga microbiológica ativa), previamente preparados, aumentando assim a quantidade produzida, a velocidade de produção de combustível, em comparado a substrato não inoculado. As proporções de inóculos utilizadas podem ser diversas, estudos mostram que a utilização de 20% de inóculos teriam os melhores resultados (LIMA JÚNIOR et al; 2018), enquanto outros estudos apontam para a utilização de 5% do volume total (OLIVEIRA et al; 2012) e até mesmo 40% de inóculos previamente preparados (XAVIER, 2010).

Resumidamente, para haver um início rápido e seguro de produção de biogás, o recomendado é que se tenha uma comunidade bacteriana já estabelecida (inóculo), além de estar adaptada ao substrato utilizado (KARLSSON et al, 2014).

1.8 Condição de pH

Os microrganismos envolvidos no processo de biodigestão anaeróbia necessitam de valores corretos de pH para seu melhor desenvolvimento e produção de metano. Dependendo do processo da biodigestão, os valores de pH mudam: na hidrólise, os valores devem estar entre 5,2 a 6,3 (onde as bactérias “aceitam” valores um pouco mais elevados); já nas fases acetogênica e metanogênica, o pH deve estar na faixa de 6,5 a 8,0. Portanto, em sistemas de biodigestores simples, a faixa de pH deve respeitar tais valores para uma melhor biodigestão anaeróbia e melhor produção de biogás (ROHSTOFFE, 2010, p. 23).

Segundo Gonçalves (2018) os microrganismos presentes no processo de biodigestão anaeróbia necessitam de pH próximo ao neutro (entre 6,5 e 7,5), pois quando tal parâmetro está abaixo de 6,0 ou acima de 8,3, o processo pode ser severamente inibido.

1.9 Biogás na Matriz Energética Brasileira

Apesar das inúmeras vantagens, a produção de biogás no Brasil representa apenas 0,05% da matriz energética no país (SEBRAE, 2018). Segundo o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGÁS), em 2015 existiam apenas 127 usinas de biogás no Brasil, produzindo cerca de 1,6 milhão de m³ do combustível diariamente. Desse total, 47% utilizavam de substratos agrícolas e 34% utilizavam de substratos da indústria. A produção para fins energéticos, porém, concentrava 43% a partir de aterros sanitários, 29% provenientes da agricultura e 22% da indústria. Outro fator importante do combustível renovável é poder suprir parte da energia consumida no Brasil. A CIBIOGÁS (2016) estima, que em 2026, a demanda por energia brasileira cresça cerca de 50%, necessitando assim de outros meios como fonte de energia.

A Associação Brasileira de Biogás (ABIOGÁS) estima que a produção brasileira tenha potencial de geração de 70 milhões de m³ por dia, utilizando-se de substratos do setor de saneamento (6 milhões m³/dia), setor de alimentos (14 milhões m³/dia) e setor sucroenergético (50 milhões m³/dia) (EMBRAPA, 2017).

O Brasil teve um salto de 87% no consumo de fertilizantes entre os anos de 2000 e 2015, onde mais de 75% do que é consumido é importado. A produção de biogás poderia também suprir parte do consumo de fertilizantes, já que o coproduto produzido é bastante vantajoso para tal (SEBRAE, 2018).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A manipueira, proveniente de mandiocas da espécie *Manihot esculenta* Crantz (vulgo mandioca brava) utilizada para realizar o preparo dos substratos foi coletada na Farinheira Primavera, localizada na cidade de Santa Maria da Serra – SP.

Inicialmente, foi necessário o preparo dos inóculos que seriam utilizados no projeto. Para tal, foram coletados dejetos suínos e bovinos; os quais foram diluídos (conforme Tabela 3) e acondicionados em tambores de polietileno de 50 litros, devidamente vedados, para ocorrer a biodigestão anaeróbia dos substratos. O tempo de retenção hidráulica para os inóculos foi de 50

dias, estabilizando a matéria orgânica e tendo produção de gás – as três fases da degradação da matéria orgânica.

Tabela 3. Diluição dos inóculos preparados

Dejeto	Água	TRH
Bovino – 1 parte	1,25 partes	50 dias
Suíno – 1 parte	2,00 partes	50 dias

Fonte: Autores.

Após a coleta, a manipueira foi armazenada em tambor de polietileno destampado e deixado ao relento, para que o ácido cianídrico pudesse ser evaporado; esse processo levou cerca de 15 dias (BOTELHO et al., 2009).

A manipueira então foi dividida em duas partes (contendo seis litros cada), onde posteriormente seria utilizada: uma parte sem correção e outra com correção de pH. Conforme aponta a bibliografia, o pH ideal de um substrato para que ocorra a biodigestão anaeróbia de maneira satisfatória, deve estar perto de 6,5. Para tal, foram utilizados cerca de 0,25% de NaHCO₃ (bicarbonato de sódio) em relação a massa de manipueira, possibilitando assim um leve aumento do pH para perto do ideal.

Para o preparo dos substratos, foram utilizados seis tambores de polietileno de cinco litros cada (estes então foram denominados biodigestores), onde em cada uma delas foram introduzidos os diferentes substratos preparados. A relação dos substratos preparados pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4. Dados relevantes sobre os substratos preparados para a realização dos experimentos

SUBSTRATOS PREPARADOS (VOLUME DE 2500 ML CADA)				
Biodigestor	% de manipueira	Correção de pH	% de inóculo bovino	% de inóculo suíno
01	100,0	Não	-	-
02	100,0	Sim	-	-
03	80,0	Não	20,0	-
04	80,0	Sim	20,0	-
05	80,0	Não	-	20,0
06	80,0	Sim	-	20,0

Fonte: Autores.

Após a adição dos substratos, cada qual em seu biodigestor devidamente identificado, foram então vedados com auxílio de luvas de látex e fita, para se manter assim o sistema anaeróbio, além da possibilidade de armazenamento dos gases com o auxílio das luvas. Os biodigestores preparados podem ser observados na Figura 1.

Figura 1. Biodigestores com os substratos, cada qual de diferentes características



Fonte: Autores.

Inicialmente os biodigestores foram acondicionados em local seco e ao abrigo do sol por cerca de 10 dias. Após esse período, os biodigestores foram expostos ao relento, para que com a luz e calor solar a temperatura pudesse estar mais próxima do ideal para ocorrer a biodigestão anaeróbia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os 10 primeiros dias de TRH os biodigestores não apresentaram produção de gases da biodigestão anaeróbia; por tal motivo, os mesmos foram expostos ao relento, recebendo assim luz e calor solar para potencializar o processo.

Devido ao fato de que as luvas de látex utilizadas poderiam causar vazamentos (devido a furos, rasgos, etc.), as mesmas foram substituídas no 11º dia do tempo de retenção hidráulica, evitando assim a perda dos gases gerados no processo. Foram então adaptadas torneiras plásticas nas tampas dos biodigestores, onde com elas seria possível a retenção e a liberação dos gases gerados. A adaptação das torneiras nos biodigestores pode ser observada na Figura 2.

Figura 2. Adaptação realizada, possibilitando a retenção e a liberação dos gases gerados



Fonte: Autores.

Durante o decorrer dos dias, todos os biodigestores produziram gases de maneira discreta, onde pôde ser observado que, com a incidência solar sobre os substratos, a produção de gases era maior. Essa característica pôde ser observada pelo estufamento dos biodigestores quando estes eram expostos ao sol. Tal característica pode ser observada na Figura 3.

O tempo de retenção hidráulica (TRH) utilizado para o experimento foi de 50 dias, após esse período, toda a produção possível de biogás já havia sido realizada, e o substrato já estava estabilizado.

Figura 3. Biodigestores expostos ao sol (3A) produzem mais gases do que os não expostos ao sol (3B)



Fonte: Autores.

3.1 Produção de Biogás

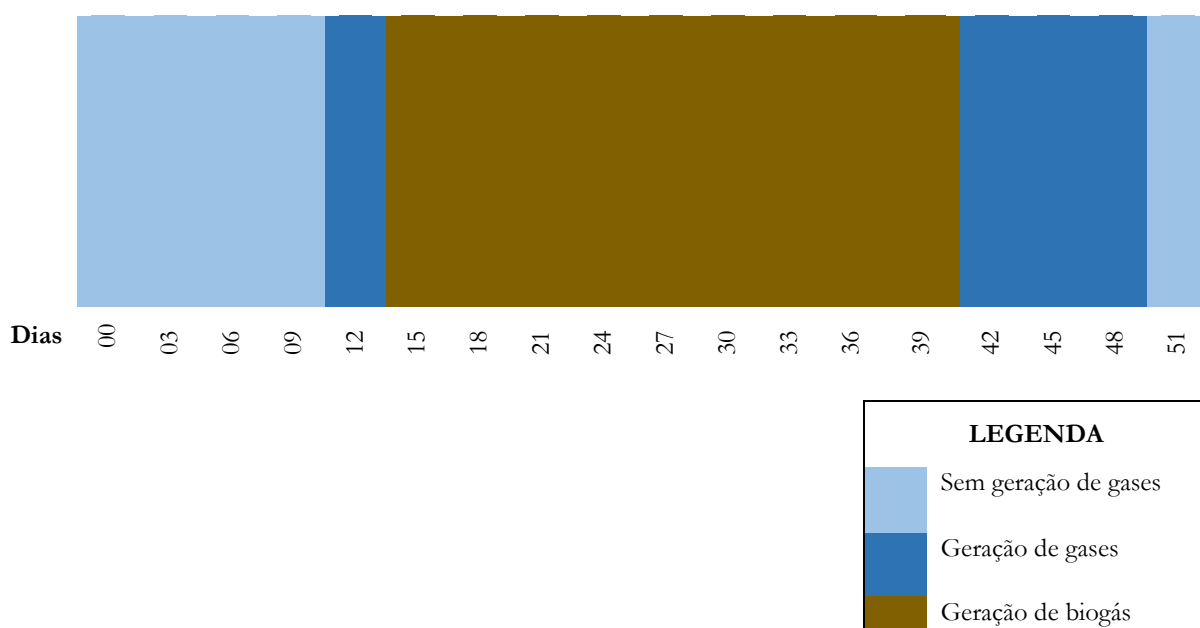
Os biodigestores foram acondicionados em local seco e ao abrigo do sol por cerca de 10 dias; porém nesse período não houve produção de gases. Após esse período, os biodigestores foram expostos ao relento, para que com a luz e calor solar, pudesse haver um aumento da produção dos gases da biodigestão anaeróbia.

Os biodigestores de números 01, 02, 03, 05 e 06 apresentaram produção de gases após o 10º dia de biodigestão anaeróbia, onde a produção de tais gases manteve certa constância até os últimos dias do experimento. Testes foram realizados a cada dois dias em uma tentativa de se obter chamas provenientes dos gases gerados; porém todas essas tentativas foram sem sucesso até o final do tempo de retenção hidráulico estipulado, indicando assim que o processo de biodigestão anaeróbio para tais biodigestores não produziu biogás.

Já o biodigestor de número 04 foi o único a produzir biogás. A produção do biocombustível teve início por volta do 15º dia de biodigestão anaeróbia, se estendendo até o 40º dia de TRH; ou seja, houve produção de biogás por cerca de 25 dias ininterruptamente (foram realizados testes de chamas a cada dois dias). Após esse período, a produção de biogás decresceu bastante, a ponto de que no 50º de TRH já não foram gerados mais gases (biogás). Devido à falta de equipamentos adequados, não foi possível mensurar a quantidade de biogás produzido pelo biodigestor número 04. Uma estimativa da produção de biogás no biodigestor 04 pode ser observada no Gráfico 1.

Gráfico 1. Estimativa da geração de biogás no biodigestor nº 04

Estimativa da produção de gases durante o tempo



Fonte: Autores.

3.2 Análise das Chamas do Biogás

No 30º dia de tempo de retenção hidráulica, foram realizados testes de queima do biogás gerado pelo biodigestor número 04. As chamas produzidas podem ser observadas na Figura 4.

Figura 4. Queima do biogás gerado na presença de luz (4A e 4B) e na ausência de luz (4C)



Fonte: Autores.

A caracterização das chamas no momento da queima indica a combustão completa do biocombustível resultante. Quando a chama é de cor azul, indica que a combustão está ocorrendo de forma completa, havendo assim um balanceamento entre o combustível e o oxigênio. Quando a chama é de cor amarela ou vermelha, indica que a combustão está incompleta, ou seja, a quantidade de combustível e oxigênio não está balanceada (FARIA, 2017).

Lucas Junior (2003) descreve as chamas provenientes do biogás como “azul clara e rodeada de um azul mais claro”. As chamas provenientes do biodigestor nº04 apresentaram coloração azul intensa, indicando assim uma maior concentração de metano, consequentemente uma temperatura mais alta e um maior poder calorífico.

Observando as imagens obtidas na queima do biogás gerado, é possível observar a cor azul predominante nas chamas, indicando assim que a quantidade de metano gerada na biodigestão anaeróbia foi suficiente para que a combustão ocorresse de maneira completa.

3.3 Análise do Efluente Antes e Após a Biodigestão Anaeróbia

Antes de serem preparados os substratos utilizados para a biodigestão anaeróbia, a manipueira teve alguns parâmetros mensurados para que, após a realização dos experimentos e do

tempo de retenção hidráulica previsto, o efluente pudesse ser novamente analisado para que os valores então pudessem ser comparados. As análises foram realizadas em um laboratório da cidade de Piracicaba – SP. Os resultados das análises iniciais podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5. Dados relevantes sobre Manipueira provida da espécie *Manihot esculenta* Erantz

Produto	pH (25° C)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Sólidos totais (mg/L)	Umidade (%)
Manipueira (<i>Manihot esculenta</i> <i>Crantz</i>)	4,63	8.540	12.400	4.165	99,58

Fonte: Autores.

Após os 50 dias de tempo de retenção hidráulica, o substrato referente ao biodigestor de número 04 (aquele em que houve a produção de biogás) foi analisado para que os valores pudessem ser comparados com os da manipueira. Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6. Dados relevantes sobre o substrato após a biodigestão anaeróbia

Produto	pH (25° C)	DBO	DQO	Sólidos totais (mg/L)	Umidade (%)
Substrato do biodigestor 04 (manipueira + inóculo bovino)	7,50	< 1.032	-	9.350	99,065

Fonte: Autores.

Pode-se observar que a biodigestão anaeróbia praticamente estabilizou o pH da manipueira (mantendo esse pH levemente alcalino), além de proporcionar um aumento dos sólidos totais presentes no biofertilizante e, conseqüentemente, um aumento de nutrientes. A umidade teve uma leve redução, em décimos, os sólidos totais tiveram aumento de 2,49 vezes que a condição inicial.

A análise de DBO apresentou drástica redução (cerca de 88%), indicando que o biofertilizante está apto para ser utilizado no solo. Além disso, a redução de DBO do substrato atende o decreto nº 8.468 da CETESB (1976), onde a eficiência de redução da demanda bioquímica de oxigênio deve ser de, no mínimo, 80% para descarte do efluente.

CONCLUSÕES

Foi perfeitamente possível utilizar a manipueira para geração de biogás, utilizando de inoculação bovina, juntamente com correção do pH do efluente. O biogás gerado pode ser utilizado para geração de energias térmica e elétrica, com o aproveitamento na própria agroindústria.

Gerou-se também biofertilizante: um material bio-estabilizado, com um pH praticamente estabilizado e com maior quantidade de sólidos totais (indicando aumento de nutrientes), que pode atender perfeitamente parte da demanda de fertilizantes na própria agroindústria.

Além disso, houve uma drástica redução de DBO contida inicialmente na manipueira, atendendo o decreto nº 8.468 da CETESB (1976), onde o processo de biodigestão anaeróbia reduziu em mais de 80% a matéria orgânica presente no efluente.

Tal processo pode ser realizado em indústrias farinhas e feculárias, com o intuito de geração de biogás, reduzindo custos com energia elétrica (equipamentos) e combustíveis (para aquecimento), além de possibilitar uma destinação ambientalmente correta aos rejeitos gerados.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. P. C. *Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico*. Dissertação (Bacharel em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Uberlândia: 2017.

BNDES. **Biogás: a próxima fronteira da energia renovável**. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/biogas>. Acessado em 01 de maio de 2019.

BOTELHO, S. M.; POLTRONIERI, M. C.; RODRIGUES, J. E. L. F. Manipueira: um adubo orgânico para a agricultura familiar. XIII Congresso Brasileiro de Mandioca. *Revista Raízes e Amidos Tropicais*, Botucatu, v. 5, p. 1111-1116, jul. 2009.

CASTRO, D. S., MATEUS, V. O. *Produção de biogás a partir de restos de alimentos coletados em um restaurante: uma experiência a ser disseminada*. Artigo Científico (XV SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica). Universidade Salvador – UNIFACS. Salvador: 2016.

CENTRO DE PRODUÇÕES TÉCNICAS (CTP). *Biofertilizante também é produto do biodigestor*. Disponível em: <https://www.cpt.com.br/noticias/biofertilizante-biodigestor>. Acessado em 07 de maio de 2019.

CIBIOGÁS. *Relatório do grupo AD HOC de biocombustíveis do Mercosul (GAHB) sobre biogás e biometano*. Disponível em: <https://cibiogas.org/sites/default/files/Relat%C3%B3rio%20GAHB%20Biog%C3%A1s%20e%20Biometano.pdf>. Acessado 27 de outubro de 2019.

Bioenergia em revista: diálogos, ano/vol. 13, n. 1, jan./jun. 2023. P. 110-128.

Produção de biogás a partir da água residual de mandioca (manipueira) utilizando diferentes métodos e inóculos
MARTINS, Diego Fernando; KEWITZ, Felipe Senna; MAZZONETTO, Alexandre Witier;
ALONSO, Luis Felipe Toro

CETESB. *Decreto nº 8.468, de 08 de setembro de 1976*. Disponível em:

cetesb.sp.gov.br/Institucional/documentos/Dec8468.pdf. Acessado em 21 de outubro de 2019.

DALLACORTE, F. C. *Fontes Renováveis: O grande potencial para o biogás no Brasil*. Disponível em: <https://sebraers.com.br/energia/o-grande-potencial-para-o-biogas-no-brasil/>. Acessado em 19 de abril de 2019.

DUARTE, A. S.; SILVA, E. F. F.; ROLIM, M. M.; FERREIRA, R. F. A. L.; MALHEIROS, S. M. M.; ALBUQUERQUE, F. S. Uso de diferentes doses de manipueira na cultura da alface em substituição à adubação mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n., p. 262–267, 2012.

DUSOL – ENGENHARIA SUSTENTÁVEL. *Entenda a matriz energética brasileira*. Disponível em: <https://www.dusolengenharia.com.br/post/entenda-a-matriz-energetica-brasileira/>. Acessado em 10 de dezembro de 2019.

EMBRAPA. *Calagem (2019)*. Disponível em:

https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_34_711200516717.html. Acessado em 23 de novembro de 2019.

EMBRAPA. *Demanda por fontes de energia renováveis (2017)*. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/documents/1355242/0/Painel+1.pdf>. Acessado 27 de outubro de 2019.

EMBRAPA. *Manipueira, um líquido precioso*. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18147209/manipueira-um-liquido-precioso>. Acessado em 19 de novembro de 2019.

FARIA, M. *Biogás produzido em aterros sanitários – aspectos ambientais e aproveitamento do potencial energético*. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental e Negócios). Universidade de São Paulo – USP. São Paulo: 2017.

FRAGMAQ. *Biogás no Brasil: Sua importância na matriz energética brasileira*. Disponível em

<https://www.fragmaq.com.br/blog/biogas-no-brasil/>. Acessado em 19 de abril de 2019.

GONÇALVES, M. N. *Os efeitos da temperatura na produção de Biogás em biodigestores*. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Uberlândia: 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Prices High-quality data on end-use energy prices*. Disponível em: <https://www.iea.org/statistics/prices/>. Acessado em 21 de outubro de 2019.

JUNQUEIRA, S. L. C. D. *Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado*. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro – URFJ. Rio de Janeiro: 2014.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOSH, F. F.; PEDROSO, A.G. *Manual básico do biogás*. Editora Univates, Lajeado 2014, p. 8 - 45.

Bioenergia em revista: diálogos, ano/vol. 13, n. 1, jan./jun. 2023. P. 110-128.

Produção de biogás a partir da água residual de mandioca (manipueira) utilizando diferentes métodos e inóculos
MARTINS, Diego Fernando; KEWITZ, Felipe Senna; MAZZONETTO, Alexandre Witier;
ALONSO, Luis Felipe Toro

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. *Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator uasb da ete-usfes*. Dissertação (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória: 2012.

LIMA JR, S. R.; PAES, J. L.; ALVES, T. B. S. *Efeito da adição de inóculo no processo de biodigestão anaeróbica de dejetos de bovino*. Artigo Científico (VII Congresso Brasileiro de Energia Solar). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Gramado: 2018.

LUCAS JUNIOR, J.; SOUZA, C. F.; LOPES, J. D. S. *Manual de construção e operação de biodigestores*. 1. Ed. Viçosa: CPT - centro de Produções Técnicas, 2003. V. 1. 40 p.

MATOS, C. F. *Produção de Biogás e Biofertilizante a Partir de Dejetos de Bovinos, sob Sistema Orgânico e Convencional de Produção*. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental). Universidade Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. Seropédica: 2016.

OLIVEIRA, M. C. R.; MARRIEL, I. E.; PAIVA, C. A. O.; CALAZANS, G. M.; CRUZ, J. C. *Concentração de inóculo e produção de biogás em reator de batelada alimentado com água residuária de suinocultura*. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas 2012, p. 9 – 18.

OLIVEIRA, R. S. *Avaliação dos impactos ambientais e aplicação das normas regulamentadoras de segurança do trabalho em uma unidade processadora de derivados mandioca na região noroeste do Paraná*. Dissertação (Graduação em Engenharia de Alimentos). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Campo Mourão: 2013.

PORTAL DO BIOGÁS. *Biofertilizantes*. Disponível em:
<https://www.portaldobiogas.com/biofertilizantes/>. Acessado em 18 de novembro de 2019.

ROHSTOFFE, F. N. *Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização*. Gülzow: Deutsches BiomasseForschungsZentrum (DBFZ), 2010. p. 23.

SANTOS, A. *Usos e impactos ambientais causados pela manipueira na microrregião sudoeste da Bahia-Brasil*. In: Problemas sociales y regionales em América Latina: estudio de casos. Barcelona: Universitat de Barcelona, 2009. p. 11-25.

SEBRAE. *O grande potencial para o biogás no Brasil (2018)*. Disponível em:
<https://sebraers.com.br/energia/o-grande-potencial-para-o-biogas-no-brasil/>. Acessado em 19 de abril de 2019.

TSCHOEKE, I. C. P.; SILVA, L. F.; SANTOS, A. F. M. S.; SOUZA, T. B. C. Análise da carga orgânica da manipueira em casas de farinha. *Revista brasileira de agrotecnologia*, v. 7, n. 2 (2017) páginas 228 – 232.

XAVIER, C. A. N.; LUCAS JR., J. *Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculos*. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, 30, n. 2, p. 212-223, mar/abr. 2010.

1 MARTINS, Diego Fernando. Possui graduação em Engenharia Civil pela Faculdades Guarapuava(2016), graduação em Administração pela Universidade Estadual do Centro-Oeste(2006), especialização em Gestão de Projetos pelo Centro Universitário Internacional(2009) e ensino-medio-segundo-graupelo Colégio Estadual Padre Chagas(2002). Tem experiência na área de Engenharia Civil.

2 KEWITZ, Felipe Senna

3 MAZZONETTO, Alexandre Witier . Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas - FEAGRI/UNICAMP. Mestrado em Engenharia Agrônômica - Máquinas Agrícolas/Biomassa - Colheita Integral de Cana Crua, pela Universidade de São Paulo - ESALQ/USP. Doutorado pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - Departamento de Energia - FEM/UNICAMP (Caracterização e potencial energético de biomassas residuais da região de Piracicaba - SP). Na Graduação envolveu-se em Pesquisa/Desenvolvimento de processos térmicos, desenvolvendo um secador rotativo de sementes e outro de leiteo fluidizado. Desde o Mestrado vem trabalhando com fontes renováveis de energia e biomassas residuais (tratamento e geração de energia); levando-o a cursar Química na Universidade Mackenzie (Bacharel, Licenciatura e Industrial). Processos térmicos para obtenção de biocombustíveis, gaseificação, pirólise e combustão/incineração, e combustíveis sustentáveis, gás de síntese (Syngas), produção e uso do biogás - biodigestão anaeróbia de diversas biomassas residuais. Professor na FATEC Piracicaba (Biocombustíveis e Gestão Empresarial).

4 ALONSO, Luis Felipe Toro.