

UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL PARA A BORRA DO CAFÉ A PARTIR DA SUA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA: CONSTRUÇÃO DE UM REATOR DE BAIXO CUSTO

Thiago Augusto Ambrosio dos Santos (IC) e Maria Thereza de Moraes Gomes Rosa (Orientador)

Apoio: PIBITI Mackenzie

RESUMO

O biogás pode ser produzido a partir da digestão anaeróbia de resíduos e é uma fonte de combustível renovável que desempenha um papel significativo na geração local de energia elétrica. No Brasil, que é o maior produtor de café no mundo, a exploração de resíduos conhecido como borra de café torna-se de interesse estratégico. Neste contexto, este projeto baseia-se na questão de pesquisar a possibilidade tecnológica de produção de uma fonte de energia alternativa por meio da reutilização de borra de café. A abordagem consiste em se propor a construção de um protótipo de um biorreator de bancada que seja capaz de realizar a produção de biogás, utilizando como fonte principal de energia a borra de café propriamente dita. A metodologia experimental adotada para a construção do biorreator e o desenvolvimento dos ensaios de biodigestão foi desenvolvida em três etapas fundamentais: (i) a construção do biorreator; (ii) a definição da composição do processo de biodigestão adequado e; (iii) desenvolvimento de um sistema de medição da produção de biogás. O experimento foi controlado durante 20 dias, em uma temperatura média de 20°C e como resultado obteve-se uma coleta de 260 mL de água destilada, proveniente do volume de gás que foi produzido.

Palavras-chave: Biorreator. Borra de café. Biodigestão Anaeróbica.

ABSTRACT

Biogas can be produced from the anaerobic digestion of waste and is a renewable fuel source that plays a significant role in local electricity generation. In Brazil, which is the largest coffee producer in the world, the exploitation of residues known as coffee grounds becomes of strategic interest. In this context, this project is based on the question of researching the technological possibility of producing an alternative energy source through the reuse of coffee grounds. The approach consists of proposing the construction of a benchtop bioreactor capable of producing biogas, using the coffee grounds itself as the main source of energy. The experimental methodology adopted for the construction of the bioreactor and the development of the biodigestion tests was developed in three fundamental steps: (i) the construction of the bioreactor; (ii) the definition of the composition of the adequate biodigestion process and; (iii) development of a biogas production measurement system. The experiment was controlled for 20 days, at an average temperature of 20°C, and as a result, 260ml of distilled water was collected from the volume of gas that was produced.

Keywords: Bioreactor; Coffee grounds; Anaerobic Biodigestion

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

As crises energéticas ocorridas globalmente têm inspirado preocupação e motivado o desenvolvimento de tecnologias e políticas públicas direcionadas para o enfrentamento de novos desafios e minimização de consequências destrutivas. Logo, questões econômicas, geopolíticas e ambientais têm chamado a atenção do mundo para fontes alternativas de energia (GROSSMAN, 2015).

De fato, a projeção de duplicação do consumo mundial de energia nos próximos 50 anos, aliada à crescente demanda por fontes de energia de baixa ou mesmo zero emissão, aumentou a conscientização sobre os caminhos sustentáveis para atender às necessidades energéticas das futuras gerações. Desse modo, a geração de energia a partir de fontes eficientes, limpas e renováveis, como energia solar, eólica, geotérmica e biomassa, assume particular importância na era moderna e oferece grande potencial para atender às demandas de energia do futuro (SAHA et al., 2014).

Sob essa perspectiva, a biomassa torna-se uma fonte potencial de energia, a partir da exploração de matéria orgânica, para a diversificação da matriz energética, especialmente no caso brasileiro. De fato, em 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP21) – Acordo de Paris, o Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37%, até 2025, e 43%, até 2030, considerando os níveis de 2005. Como parte da política energética nacional, a fim de tornar passível o alcance dessas reduções, o país vem impulsionando a reutilização de resíduos sólidos como fontes de energia renovável (PIN, 2020), culminando na Lei Federal n.13.576/ 2017, que estabelece a Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio com a imposição de metas a serem atingidas para a produção de biocombustíveis (BRASIL, 2017).

Nesse sentido, o biogás, produzido a partir da digestão anaeróbia de resíduos, é uma fonte de combustível renovável que desempenha um papel significativo na mitigação de problemas ambientais e na geração local de energia elétrica (NEVZOROVA; KARAKAYA, 2020). Feiz et al. (2020) ainda discute sobre uma economia de base biológica e aponta a produção de biogás como estratégia para o alcance de metas nacionais como parte de uma gestão eficiente de resíduos e minimização de impactos ambientais.

A utilização final do biogás abrange diversos campos, como a produção de calor, produção de energia e produtos químicos, além de combustível para

automotores. As vantagens do biogás são muito abrangentes, mesmo se comparada a outras fontes de energias renováveis já existentes e utilizadas. Este pode ser produzido de maneira mais acessível, logo pode ser requerido quando existir a necessidade. Também, pode ser facilmente estocado, o que aumenta o tempo para sua utilização. Ainda, pode ser usado semelhantemente ao gás natural, além de poder substituir os combustíveis fósseis na questão da mobilidade das pessoas (HOLM-NIELSEN; AL SEADI; OLESKOWICZ-POPIEL, 2009; PARSAAE; KIANI; KARIMI, 2018; PIN et al, 2020). Neste contexto, o estudo laboratorial para a produção de biogás a partir de distintos substratos, é relevante.

No âmbito brasileiro, a exploração de resíduos do café torna-se de interesse. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC), o Brasil é o maior produtor de café no mundo, sendo responsável por um terço da produção mundial, de modo a destacar o Estado de São Paulo como um dos mais tradicionais da cafeicultura brasileira. No tocante ao consumo de café pelo mercado interno do país, dados estatísticos apontam um crescimento consistente, de modo que, entre 1990 (8,2 milhões de sacas) e ano 2000 (13,2 milhões de sacas), o brasileiro aumentou seu padrão de consumo em 61%, alcançando um índice de 21 milhões de sacas em 2018, de modo a corresponder a uma elevação de 156% em menos de 20 anos (ABIC, 2020).

Logo, esse projeto baseia-se na questão de pesquisar a possibilidade tecnológica de produção de uma fonte de energia alternativa por meio da reutilização de resíduo do café, conhecido popularmente como borra de café. Para isto, a abordagem consiste em se propor a construção de um protótipo de um biorreator de bancada que seja capaz de realizar a produção de biogás, utilizando como fonte principal de energia a borra de café propriamente dita.

1.2 JUSTIFICATIVA

A importância de estudos no setor elétrico, com enfoque em geração de novas tecnologias, é de particular importância, uma vez que se trata de um segmento estratégico no qual novos desafios estão imperando e demandando soluções viáveis (BERGLUND; BORJESSON, 2006; FEIZ et al., 2020; PIN, 2020).

Ademais, o presente projeto está associado a um tema (biocombustível) de relevância nacional (BRASIL, 2017) e contemporâneo, apresentando harmonia com diversos outros estudos de literatura direcionados à geração de energia a partir de fontes renováveis. Essa temática de estudo assume especial interesse em países

emergentes, como o Brasil, nos quais as tecnologias de biogás estão apenas começando a serem utilizadas, enquanto os países desenvolvidos, principalmente regiões da Europa, encontram-se em um grau de maturidade mais elevado (NEVZOROVA; KARAKAYA, 2020).

Pesquisas demonstram a viabilidade técnica e econômica do uso do biogás (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010; PARSAEE; KIANI; KARIMI, 2019). Além de reduzir a emissão de poluentes na atmosfera, o biogás reduz o uso de combustíveis fósseis e fornece um destino para o resíduo sólido urbano. Com o crescimento e expansão do uso do biogás, será possível estimular o desenvolvimento tecnológico e o setor industrial especializado em biodigestores, motores, conversores, unidades de controle e outros equipamentos, permitindo um aumento de emprego e renda na cadeia produtiva.

Logo, a partir do desenvolvimento de um protótipo de baixo custo, esse projeto prevê:

- contribuir para a formação de uma matriz energética baseada no conceito de sustentabilidade, uma vez que se baseia no uso de borra de café classificada como resíduo;
- propor uma alternativa para a redução do consumo de energia elétrica fornecida pelas concessionárias que pode estar fortemente afetadas por crises nos sistema hídrico e;
- contribuir para a racionalização do uso de derivados de petróleo, como combustível fóssil, que são extremamente prejudiciais para o meio ambiente.

1.3 OBJETIVO

Esse projeto tem como objetivo geral construir um protótipo de reator de bancada para o estudo da reutilização da borra do café como fonte de energia, bem como estudar os parâmetros relacionados a essa proposta. Especificamente, pretende-se: (i) estudar os tipos de biorreatores; (ii) construir um biorreator de bancada de baixo custo preenchido com resíduo orgânico, especificamente borra de café; (iii) avaliar parâmetros físico-químicos da biodigestão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A caracterização de resíduos sólidos refere-se àqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. São incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível (ABNT, 1987).

Os resíduos são classificados para melhor manuseá-los, entendê-los e reutilizá-los. A NBR 10004 - Classificação de resíduos (ABNT, 1987) emprega três categorias para classificar os resíduos (Quadro 1), de acordo com suas características e propriedades.

Quadro 1: Classificação de resíduos de acordo com a Norma NBR 10004

Classe	Descrição
Classe I – Perigosos	Apresentam periculosidade como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade
Classe II – Não-inertes	Não pertencem nem à classe I nem à classe III, podendo ter as características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água
Classe III – Inertes	Não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente. Quando misturados em água destilada, não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Fonte: Adaptado de ABNT (1987)

A gestão adequada desses resíduos, explorando ações de reutilização inclusive, vem ganhando destaque, uma vez que o gerenciamento inadequado dos resíduos sólidos contribui para o agravamento de questões ambientais e de saúde pública (GOUVEIA, 2012).

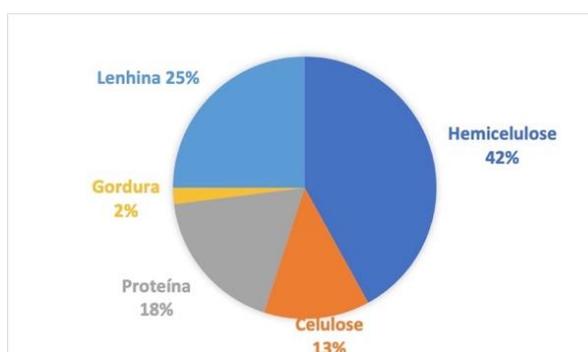
2.1.1 Resíduos do café

A Organização Internacional do Café aponta que, no ano-safra 2017/18, a produção mundial foi de 158,6 milhões de sacas de 60 kg. Os maiores países produtores de café nesse período foram, nessa ordem, Brasil, com 51,0 milhões de sacas; Vietnã, com 29,500 milhões; e Colômbia, com 14 milhões (MAGNAGO et al., 2019).

A questão é que algo com uma proporção tão grande nos dias de hoje gera muitos impactos ambientais em sua produção, como o desmatamento, perda de biodiversidade, acidez e erosão do solo. O processo de retirada da polpa pelo sistema úmido gera grande quantidade de efluentes, com valores em torno de 23 m³ por tonelada de fruta processada. Estudos mostram que esse tipo de resíduo pode ser perigoso para a saúde se descartado em lugares inadequados como nos leitos dos rios (CHANAKYA; ALWIS, 2004).

O resíduo do café, mais conhecido como borra, é formado a partir do contato do café com água quente para a extração de materiais solúveis, sendo que sua composição possui compostos orgânicos como proteínas, lipídios e minerais. Figura 1 mostra a composição química da borra de café.

Figura 1 - Composição química da borra do café



Fonte: Adaptado de Karmee, Swanepoel e Marx (2018).

A borra de café é composta por diferentes tipos de açúcares, nomeadamente manose, galactose, glicose e arabinose (KARMEE; SWANEPOEL; MARX, 2018). Os açúcares, também chamados de hidratos de carbono, podem ser classificados como redutores e não redutores, de modo que os redutores, como possuem na sua estrutura grupos aldeídos e cetonas livres, podem sofrer oxidação. Os não redutores, como por exemplo a sacarose, possuem grupos interligados por uma ligação glicosídica e podem tornar-se redutores caso essa ligação seja quebrada através de uma hidrólise ácida (SAMPAIO et al., 2020).

Pesquisas sobre o café e sua composição abriram espaço para várias tentativas de utilização de sua polpa para a produção de biogás por meio de digestão anaeróbica. De acordo com Gathuo, Rantala e Maatta (1991), estima-se que 131 m³ de biogás podem ser produzidos a partir de 1 tonelada de polpa de café, de modo

que essa quantidade em biogás é proporcional a 100 litros de gasolina em valor de combustível.

2.2 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A conversão bioquímica de resíduo sólido pode contribuir significativamente para a produção de energia elétrica e térmica renovável. Nessa perspectiva, o uso de resíduos da cadeia do café é significativamente sustentável e pode resolver o problema associado ao fato de que mais de 90% dessa matéria é comumente descartada após o uso. Ressalta-se que a biomassa do resíduo do café é rica em lipídios e não necessita de pré-tratamento, apresentando, assim, um bom comportamento de produção de biogás, de modo a resultar em mais de 1 litro de metano (LUZ et al., 2017).

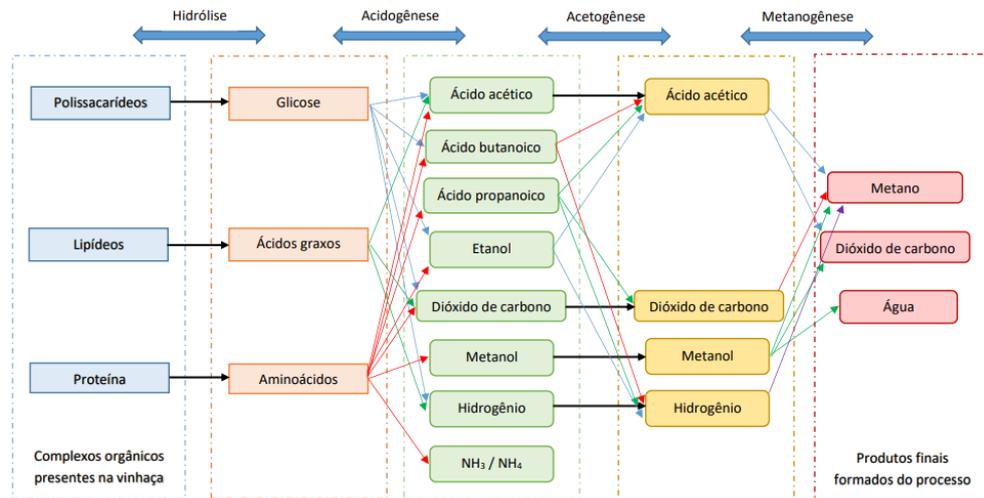
2.2.1 Biodigestão anaeróbica

Os biodigestores anaeróbicos são usados para o tratamento de resíduos orgânicos, gerando o biogás, usado na geração de energia; e o biofertilizante de alta qualidade, empregado na adubação agrícola. A quantidade de biogás produzida depende da matéria-prima utilizada (carga orgânica), da tecnologia de pré-tratamento, da temperatura e do tempo de residência no reator (ORRICO JUNIOR; ORRICO; LUCAS JUNIOR, 2010).

Para a produção de biogás, é necessária que a matéria orgânica seja decomposta, passando por quatro fases da biodigestão anaeróbica. A Figura 2 apresenta os quatro estágios da biodigestão anaeróbica, que se inicia com a hidrólise, em que as enzimas produzidas pelas bactérias transformam polímeros em monômeros. Segue-se para a acidogênese, onde esses monômeros são hidrolisados em compostos menores, como ácidos graxos voláteis e álcoois. Já na acetogênese, esses ácidos graxos voláteis são transformados em ácido acético, gás carbônico e hidrogênio gasoso. As condições ideais para essa etapa são temperaturas na entre 29 °C e 45 °C e pH entre 5,2 e 6,5. Finalmente, tem-se a metanogênese, de modo que o ácido acético é transformado em metano e gás carbônico, pelas bactérias metanogênicas acetoclásticas, bem como o gás carbônico e o hidrogênio são combinados, formando metano, pelas bactérias metanogênicas hidrogenotróficas (PARKER, 2005).

Como resultado dessa última etapa, é gerado o biogás, que possui como composição típica 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio. As condições ideais para essa etapa consistem em temperaturas entre 22 °C e 37 °C e pH entre 6,8 a 7,2 (GALBIATTI et al., 2010).

Figura 2: Etapas da biodigestão anaeróbica da vinhaça



Fonte: Adaptado de Parsaei, Kiani e Karimi (2019).

Uma importante observação em relação ao biogás está relacionada com a necessidade deste ser resfriado, drenado e seco logo após sua produção. O gás sulfídrico (H₂S), formado durante a biodigestão e presente no biogás, dificulta a sua geração de energia. Logo, sua medição no experimento é importante para o conhecimento de seu teor no biogás a fim de diminuir sua concentração (HOLM-NIELSEN; AL SEADI; OLESKOWICZ-POPIEL, 2009).

2.3 BIORREATORES

Diversos modelos de biorreatores foram desenvolvidos nas últimas duas décadas, procurando maneiras diferentes de reter e destacar os resíduos. Nos biodigestores, as entradas de ar são isoladas dentro dos dispositivos, podendo ser utilizadas várias formas construtivas para que o processo de digestão anaeróbica ocorra, sendo as mais comuns exemplificadas a seguir.

2.3.1 Biorreator - Manta de lodo Anaeróbico Ascendente (UASB)

Um UASB típico é projetado para bombear o resíduo para o fundo do reator e o mesmo flui para cima, por meio de uma camada suspensa de células microbianas, chamada de manta de lodo, onde os resíduos são degradados. O reator possui um separador de sólidos, líquidos e gases para organização da biomassa a partir de biogás e líquido tratado. O separador trifásico é multifuncional, o qual tem a capacidade de permitir o contato e a reação de micróbios com os resíduos, além de reter os microrganismos sem a necessidade de um tanque de decantação separado. O UASB tem sido utilizado no tratamento de águas residuais industriais, como por exemplo no processamento de alimentos, pecuária, ácidos graxos, fermentação, efluentes de celulose e papel e produtos farmacêuticos. Esse reator é atualmente o anaeróbico mais popular por conta de seu alto desempenho, construção simples, capital modesto e além disso, exibe características sustentáveis como o baixo rendimento de lodo e baixo consumo de energia (SHOW et al., 2020).

2.3.2 Biorreator - Reator anaeróbico defletor (ABR)

O ABR foi projetado para reduzir o tempo de inicialização e obter maior desempenho. Foi revelado que a granulação ocorreu relativamente rápido no ABR em comparação com outras configurações. O ABR continha uma população diversificada de metanógenos em todas as câmaras confusas. O uso de anaeróbios soltos condicionados a polímeros biossólidos misturados com grânulos como inóculos mostraram-se favoráveis (SHOW et al., 2020).

2.3.3 Biorreator - Reator de tanque com agitação contínua (CSTR)

O projeto CSTR envolve um reator muito grande e retenção de líquidos em longa duração, entre 2 a 4 semanas, com baixas taxas de carregamento orgânico e menor retenção de biomassa devido à sua hidrodinâmica completamente mista. Os grânulos cultivados se desintegraram em 21 dias, quando os CSTRs foram incubados em condição estática, em vez de serem agitados. O cisalhamento hidráulico parecia ser vital para manter a integridade do grânulo. De acordo com o resultado dos testes e observações, a granulação depende da maneira pela qual o reator é operado, e não do tipo de reator. Ao contrário dos UASBs ou EGSBs, nos quais o líquido se move em um padrão de fluxo regular, a biomassa é completamente misturada e se move de maneira aleatória nos CSTR. O estudo

contradiz o conceito de que o padrão de fluxo de líquido é crucial para o desenvolvimento de grânulos (SHOW et al., 2020).

3 METODOLOGIA

Para a construção do biorreator e o desenvolvimento dos ensaios de biodigestão foram desenvolvidas as etapas descritas a seguir.

3.1 ETAPA A: CONSTRUÇÃO DO BIORREATOR

Os materiais básicos que foram utilizados para a construção do biorreator foram baseados no estudo realizado por Santos (2014). A Tabela 1 apresenta os materiais adquiridos para a implementação do projeto. A estrutura foi formada por um cano PVC de 200 mm de diâmetro e 1 m de altura, ao qual foi isolada por anéis de vedação próprios para isso em ambas as tampas. A tampa superior possui dois adaptadores com flange para a instalação do manômetro e da válvula de biogás, a qual é plugada a uma mangueira entrando em contato com o sistema de medição de volume de gás. A tampa inferior possui apenas um adaptador com flange para a instalação de uma válvula esférica de diâmetro um pouco maior para a eliminação dos resíduos do tanque. O biorreator fica apoiado em uma estrutura de madeira que o deixa com 1,5 m de altura e permite um melhor manuseio e o apoio de sua base com a válvula de descarte.

Tabela 1 - Materiais e seus respectivos preços

Item	Materiais	Preço	Quantidade	Valor Final
1	Tubo PVC 200mm	R\$ 122,00	1	R\$ 122,00
2	Tampa PVC 200mm	R\$ 65,00	2	R\$ 130,00
3	Anel de vedação 200mm	R\$ 20,00	2	R\$ 40,00
4	Adaptador com flange	R\$ 20,00	3	R\$ 60,00
5	Manômetro de 3,0 kgf/cm ²	R\$ 26,50	1	R\$ 26,00
6	Válvula de esfera	R\$ 30,00	2	R\$ 30,00
7	Adaptador engate com rosca	R\$ 12,00	1	R\$ 12,00
8	Mangueira	R\$ 30,00	1	R\$ 30,00
Total	-	-	13	R\$ 450,00

Fonte: Autor

3.2 ETAPA B: BIODIGESTÃO DA BORRA DE CAFÉ

Para realização do processo de biodigestão da borra de café foram utilizados os materiais descritos na Tabela 2 juntamente com suas respectivas quantidades.

A água de reuso foi retirada do poço artesiano de um condomínio em São Paulo, a borra do café foi obtida a partir da doação da Padaria Big Bread, localizada no bairro Tatuapé, na Zona Leste de São Paulo, e o esterco bovino fresco foi recolhido de um sítio em Mariporã.

Tabela 2: Quantidade dos materiais utilizados para a biodigestão no reator.

Material	Quantidade
Água de reuso	12 L
Borra de café para diluição	800 g
Borra de café como substrato	40 g
Esterco bovino fresco	800 g

Fonte: Autor

3.3 ETAPA C: MEDIÇÃO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS

Foi empregado um sistema de instrumentação de baixo custo proposto por Santos (2014) e Teixeira (2019). O conjunto básico de elementos necessários consiste em: (i) conexão do biorreator que acomoda os materiais envolvidos nos processos de biodigestão com o recipiente que será utilizado para a captação do gás produzido; (ii) válvula de controle de saída do gás produzido no biorreator; (iii) manômetro de 2,0 kgf/cm² para medição da pressão do gás produzido; (iv) conjuntos de flanges apropriadas para conexão das válvulas e manômetro ao biorreator e também ao recipiente utilizado como sistema de medição do volume de gás produzido. Esse sistema de medição de volume de gás de baixo custo, produzido de acordo com Teixeira (2019) contendo: (i) recipiente para água destilada para ser comprimida pelo gás produzido; (ii) adaptadores e flanges para conexão das mangueiras para entrada do gás produzido e saída da água comprimida pelo gás; (iii) recipientes para armazenamento da água destilada drenada para medição do volume. Foram utilizadas mangueiras apropriadas para sistemas pneumáticos (mangueira azul) para coleta de gás do biorreator até o sistema de medição em questão, de acordo com a Figura 3. A Tabela 3 apresenta os materiais adquiridos para a implementação do sistema de medição.

Figura 3: Mangueira azul e suas conexões



Fonte: Autor

Tabela 3: Custo dos materiais para a construção do sistema de medição.

Item	Materiais	Preço	Quantidade	Valor Final
1	Pote de vidro	R\$ 10,00	1	R\$ 10,00
2	Adaptador com flange	R\$ 20,00	1	R\$ 20,00
3	União T	R\$ 20,00	1	R\$ 20,00
4	Adaptador engate com rosca	R\$ 12,00	2	R\$ 24,00
Total	-	-	5	R\$ 74,00

Fonte: Autor.

Uma vez estabelecido este procedimento de projeto do biorreator, o desenvolvimento das etapas prescritas tem como objetivo estabelecer a implementação de um protótipo para a produção de biogás, a partir da replicação de ensaios de pesquisa já realizados por Luz et al. (2017) e Teixeira (2019), para que se possa atestar a viabilidade tecnológica de utilização da borra de café como alternativa para composição de uma matriz energética sustentável.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 BIORREATOR

A escolha do tubo PVC como objeto de controle deu-se em virtude da facilidade de se adequar as dimensões às condições de se obter o volume de *headspace* adequado. As dimensões do reator foram detalhadas no Tópico 3.1 e a Figura 4 ilustra como ficou a implementação física. A construção foi feita com todos os cuidados e precauções, para garantir o funcionamento do projeto e obter um sistema realmente próprio e isolado. Para isso, as peças, roscas e ligações foram vedadas com veda rosca e cola especial. Além do cuidado na montagem, houve testes de vazamento que foram feitos para comprovar a eficiência do isolamento do sistema, de forma a utilizar uma esponja úmida com espuma de sabão nas extremidades e conexões para verificar se haveria formação de bolhas.

Figura 4: Detalhes do reator que foi construído.



Fonte: Autor

4.2 PRODUÇÃO DO BIOGÁS

Inicialmente foi planejado utilizar lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto em Campinas. Entretanto, em virtude da pandemia e do risco de se utilizar este lodo proveniente de esgoto que poderia estar contaminado, decidiu-se utilizar materiais com o potencial de fermentação adequado para o experimento, sem correr este risco. Neste contexto, utilizou-se a borra de café, água proveniente de poço de água de mina de água para reuso e esterco bovino fresco, baseado em Luz et. al. (2017), isto é, a seleção baseou-se nos ensaios realizados com o grupo B de reatores que foram utilizados como referência na pesquisa em questão.

O ponto de partida para o preparo e caracterização do biorreator foi definir um volume útil adequado para o mesmo, compatível com o uso de um sistema de instrumentação de baixo custo para medir a produção efetiva de gás, de acordo com os resultados obtidos em Teixeira (2019).

Para isto decidiu-se utilizar um volume útil de 40% do biorreator, ou seja, desta forma seria possível manter 60% do volume do mesmo preservado para *headspace* para viabilizar o processo de medição. Neste contexto, a Tabela 2 indica as proporções utilizadas de cada material, as quais foram calculadas considerando a condição ótima de operação afirmada por Luz et. al. (2017).

Para a diluição da borra de café na água foi utilizado um galão de 20 L de capacidade. A mistura foi agitada e depois aguardou-se um período de tempo de 4 h para decantação. A Figura 3 ilustra os materiais utilizados para biodigestão. Após isso, utilizou peneira fina Malha 75 para filtrar a mistura a ser depositada posteriormente no reator.

Figura 5: Materiais utilizados para o processo de biodigestão



Fonte: Autor

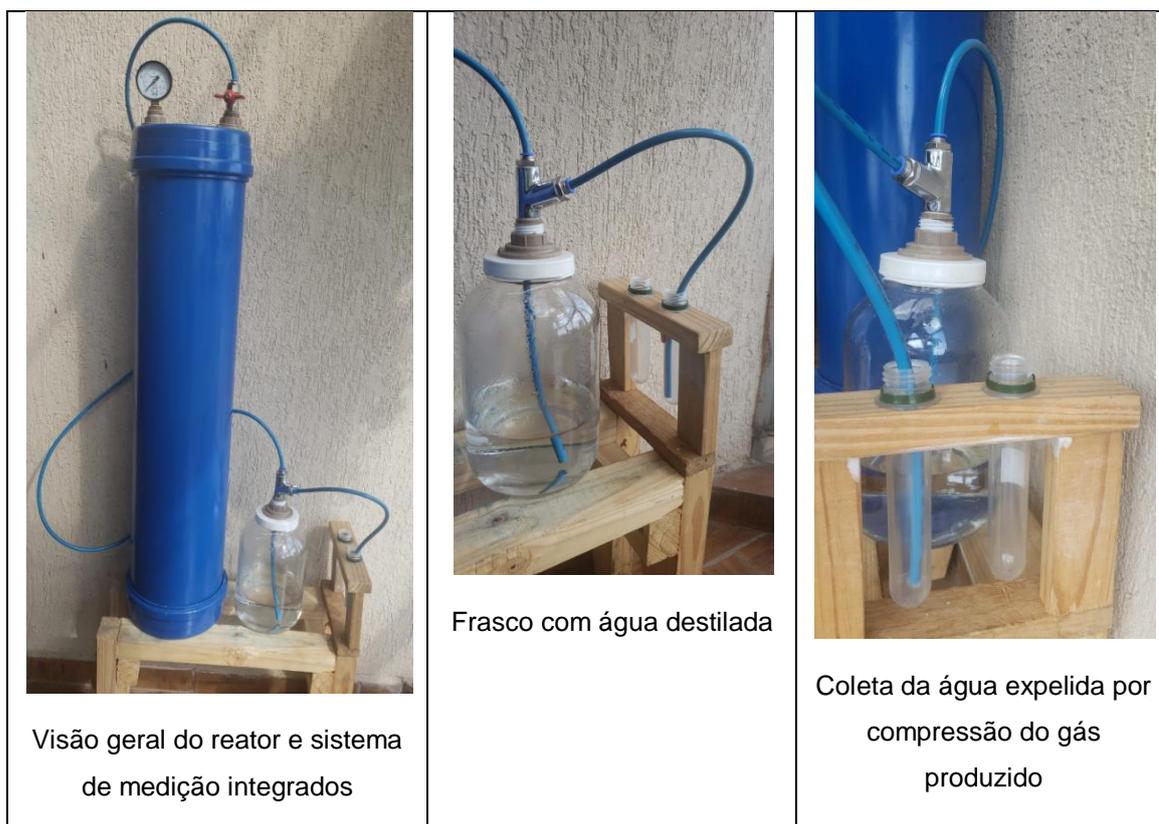
4.3 OBTENÇÃO DO BIOGÁS

Para a construção do sistema de medição do volume de gás produzido foi pesquisada a questão de como desenvolver um sistema de baixo custo. Uma vez que o princípio de medição foi a utilização de um líquido incompressível e também que não fosse reativo com o gás, a escolha foi utilizar água destilada para que não houvesse absorção do gás produzido. Foi utilizada uma cola especial à base de silicone para evitar qualquer vazamento de gás no frasco de controle que suporta o volume de água destilada.

A medição foi realizada durante 20 dias corridos, o qual foi bem próximo ao período que Luz et. al. (2017) observou em seu experimento. De acordo com sua pesquisa, esse intervalo seria suficiente para que a biodigestão ocorresse. Além disso, de acordo com Luz et al. (2017), a temperatura ideal para a reação com o uso deste tipo de resíduo é de 37°C, mas pela dificuldade em manter um ambiente nesta temperatura controlada, o experimento ocorreu a uma temperatura média de 20°C a qual foi medida levando em conta a temperatura diária durante o período. As medições ocorreram durante o mês de Julho de 2021, na cidade de São Paulo, e como não havia previsão de mudança nas condições climáticas e que o prazo de 20 dias previsto por Luz ET. AL. (2017) havia sido cumprido, decidiu-se por interromper o experimento, uma vez que não estava sendo realizado em laboratório apropriado para esta finalidade, em virtude da pandemia. Como resultado obteve-se uma coleta de 260 mL de água destilada o que equivale à quantidade de biogás obtida em todo o processo. De acordo com Luz et al. (2017), a melhor condição para a produção de biogás seria em torno de 37°C, ou seja, a temperatura deveria ser 75% maior que a praticada. Desta forma, sugere-se que este experimento seja realizado dentro de uma estufa caseira, permitindo um aumento da temperatura ambiente e consequentemente maior produção de biogás.

Nos trabalhos de Luz et al. (2017) e Teixeira (2019), foram realizados estudos detalhados da composição físico-química dos sólidos totais e sólidos voláteis utilizados nos processos de biodigestão e foram realizados também medições do potencial bioquímico do gás produzido. Todas as medições basearam-se na avaliação da quantidade de sólidos totais e voláteis que exigem instrumentação e aparatos de laboratório que não estiveram disponíveis para a realização desse projeto de pesquisa tecnológica. Portanto, uma vez que só foi possível medir o volume de gás produzido a partir do volume de água destilada comprimido e transportado para o frasco de coleta (Figura 6).

Figura 6: Detalhes de integração do sistema de medição com o reator



Fonte: Autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbica da borra do café com um reator de baixo custo foi proposto neste estudo. Foi observado uma produção de 260 mL de biogás durante 20 dias de experimento e conclui-se que melhores resultados poderiam ser obtidos com o controle da temperatura. Este projeto permitiu o aprendizado em aplicar metodologia científica para a resolução de problemas em engenharia, desde a especificação dos requisitos até a implementação final de um protótipo físico e coleta de dados experimentais.

Com o acompanhamento diário dos acontecimentos do projeto, trabalhos futuros mostraram-se possíveis de serem desenvolvidos, como a automação da instrumentação para a coleta automática de dados como temperatura, pressão e volume de água expelida.

Agradecimentos à Universidade Presbiteriana Mackenzie pelo apoio para o desenvolvimento deste projeto, e à Padaria Big Bread pelo fornecimento de borra de café para a realização dos ensaios.

6 REFERÊNCIAS

- ABIC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Evolução do consumo interno de café no Brasil**. Página institucional, Seção de Estatística, 2020. Disponível em: <https://www.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/>. Acesso em 11 Jun. 2020.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos - Classificação - NBR 10.004**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- BRASIL. Lei Federal n. 13,576, de 26 de Dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Brasília, DF, 2017.
- BERGLUND, M.; BORJESSON, P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. **Biomass Bioenergy**, v. 30, 254e66, 2006.
- CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás**. 1985. 75 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1985.
- CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. de C. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suínica para geração de energia elétrica. **Eng. Agríc.**, v. 30, n.5, p.831-844, 2010.
- COELHO, G. O. **Desenvolvimento e Caracterização de Filmes Biopoliméricos Compostos Majoritariamente por Galactomananas Recuperadas da Borra de Café**. 2019. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) – Faculdade de Farmácia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2019.
- FEIZ, R. et al. Key performance indicators for biogas production - methodological insights on the life-cycle analysis of biogas production from source-separated food waste. **Energy**, v. 200, 117462, 2020.
- GALBIATTI, J.A. et al. Estudo qualitativo do biogás produzidos por substratos em biodigestores tipo batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.432-437, 2010.
- GATHUO, B.; RANTALA, P.; MAATTA, R. Coffee Industry Wastes. **Water Sci. Technol.** v. 24, p. 53-60, 1991.
- GIRARDI NETO, J. et al. Quantificação de biogás em reatores anaeróbios através do método de deslocamento de volume de água. **Revista de estudos ambientais**, v. 16, n. 1, p. 45-53, 2014.
- GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciênc. Saúde Coletiva**, v.17, n.6, p.1503-1510, 2012.
- GROSSMAN, P. Z. Energy Shocks, Crises and the Policy Process: A Review of Theory and Application. **Energy Policy**, v. 77, p. 56-69, 2015.

HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresour Technol.**, v. 100, n. 22, p. 5478-5484, 2009.

HOYSALL, C.; ALWIS, A. Environmental Issues and Management in Primary Coffee Processing. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 82, n. 4, p. 291-300, 2004.

KARMEE, S. K.; SWANEPOEL, W.; MARX, S. Biofuel production from spent coffee grounds via lipase catalysis. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 40, n. 3, p. 294-300, 2018,

LUZ, F. C. et al. Anaerobic digestion of coffee grounds soluble fraction at laboratory scale: Evaluation of the biomethane potential. **Applied Energy**, v. 207, p.166-175, 2017.

MAGNAGO, R. F. et al. Combustível sólido a partir de biomassa residual de borra de café, casca de arroz e casca de batata. **Mix Sustentável**, v. 5, n. 2, p. 43-53, 2019.

NEVZOROVA, T.; KARAKAYA, E. Explaining the drivers of technological innovation systems: The case of biogas technologies in mature markets. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, 120819, 2020.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JUNIOR, J. Avaliação de parâmetros da biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos alimentados com dietas à base de milho e sorgo. **Eng. Agríc.**, v. 30, n.4, p. 606-607, 2010.

PARKER, W. J. Application of the ADM1 model to advanced anaerobic digestion. **Bioresour Technol.**, v. 96, n. 16, p. 1832-1842, 2005.

PARSAEE, M.; KIANI, M. K. D.; KARIMI, K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, 122, p 117–125, 2019.

PIN, B. V. R. et al. Energetic use of biogas from the anaerobic digestion of coffee wastewater in southern Minas Gerais, Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 2084-2094, 2020.

SAHA, R. et al. Rechargeable magnesium battery: Current status and key challenges for the future. **Progress in Materials Science**, v. 66, p. 1–86, 2014.

SAMPAIO, A. et al. Production, chemical characterization, and sensory profile of a novel spirit elaborated from spent coffee ground. **LWT - Food Science and Technology**, v. 54, p. 557-563, 2020.

SANTOS, E. S. P. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos no estudo das concentrações de gases de biorreatores de bancada preenchidos com resíduos orgânicos. 2014. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental., Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

SHOW, K. et al. Anaerobic granulation: a review of granulation hypotheses, bioreactor designs and emerging green applications. **Bioresource Technology**, v. 300, p. 122751, 2020.

TEIXEIRA, R. A. Digestão Aeróbica e Potencial de Geração de Biogás a partir de Borra de Café. 2019. 176 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Sustentáveis) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

Contatos: thiago.augusto4477@gmail.com e maria.rosa@mackenzie.br