

Escola SESI Reitor Miguel Calmon

**BIOTEC: Biodigestores Inteligentes para Dessulfurização de Biogás com
Nanotecnologia**

Salvador, BA

2025



Arthur Barbosa dos Santos¹

Kauan Kayodê Pancho
Almeida²

Carolina Costa Freitas
Alcântara (Orientador),
Pedro Simões de Jesus Filho
(Coorientador)

BIOTEC: Biodigestores Inteligentes para Dessulfurização de Biogás com Nanotecnologia

Relatório apresentado à 9ª FEMIC - Feira Mineira de Iniciação Científica.

Orientação da Prof.(a) Carolina Costa Freitas Alcântara e Coorientação de Pedro Simões de Jesus Filho.

Salvador, BA

2025



RESUMO

O crescimento da produção de resíduos orgânicos tem resultado no aumento proporcional do descarte inadequado, intensificando a emissão de gases de efeito estufa (GEEs), como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) que interferem essencialmente na Global Methane Pledge (Compromisso Global do Metano) e no Acordo de Paris definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) que visam a proteção e manutenção da vida humana alinhada com o meio ambiente por meio de práticas sustentáveis. Diante do exposto, é imprescindível o controle, análise e reformulação dos processos que levam à geração de poluentes a partir de resíduos orgânicos. Uma vez que esses resíduos apresentam um grande potencial de aproveitamento, podendo deixar de ser fontes de contaminação para serem transformados em insumos valiosos na produção de energia limpa, por meio da geração de biogás e na fabricação de biofertilizante a partir da digestão anaeróbica dessa matéria-prima. Dessarte o objetivo do projeto BIOTEC é o desenvolvimento de um biodigestor inteligente que utiliza o Arduino e sensores para automatizar e monitorar o processo de biodigestão através da análise dos parâmetros de temperatura e umidade, pressão, pH bem como observação do volume de metano produzido. Além de ser integrado a um sistema de filtragem de nanopartículas de ferro adsorvidos em carvão ativado para a remoção dos compostos contendo enxofre de forma a otimizar a produção do biogás. Por meio do monitoramento realizado pelo protótipo, aliado às análises por espectrofotometria UV-Vis e teste químicos de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), busca-se comprovar que o uso de um filtro de nanopartículas de ferro juntamente com o monitoramento inteligente dos parâmetros do processo de digestão para a produção de biogás, contribuam de forma significativa para a remoção da maior parte dos compostos sulfurados, dado que os óxidos de ferro em nanoescala podem reagir com o enxofre, promovendo a formação de compostos como sulfeto de ferro (FeS). Além disso, o processo viabiliza a geração de biofertilizante enriquecido com macronutrientes. Nessa perspectiva, o projeto BIOTEC pode representar um grande potencial biotecnológico, não apenas pela eficiência na purificação do biogás, como também pela facilidade na síntese do filtro de nanopartículas, e na produção de biofertilizantes, promovendo uma solução inovadora e sustentável.

Palavras-chave: Biodigestor, Biogás, Nanopartículas



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 JUSTIFICATIVA.....	12
3 OBJETIVO GERAL	13
4 METODOLOGIA	14
5 RESULTADOS OBTIDOS	30
6 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

O projeto BIOTEC busca unir inovação tecnológica com responsabilidade ambiental, aproveitando os resíduos orgânicos que normalmente seriam descartados pelos Centros de Abastecimento localizado em Salvador, conhecidos como Ceasa. Para isso, foi desenvolvido um biodigestor inteligente equipado com microcontroladores e sensores, acoplado a um sistema de filtragem de estrutura biodegradável contendo nanopartículas de ferro adsorvido em carvão ativado sintetizados pela metodologia de coprecipitação, com a finalidade de reduzir, ou até mesmo eliminar compostos sulfurados presentes no biogás, tornando-o mais puro e eficiente para uso como fonte de energia renovável.

O BIOTEC representa uma proposta alinhada aos conceitos de tecnologia, ciência e sustentabilidade, em conjunto com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU (ODS), 7 (energia acessível e limpa), 9 (inovação, indústrias e infraestrutura) e 11 (cidades e comunidades sustentáveis). Ao integrar automação, nanotecnologia e os princípios da economia circular, o projeto oferece uma alternativa inteligente para lidar com os desafios do gerenciamento de resíduos nas cidades, ao mesmo tempo em que contribui para reduzir os impactos ambientais e valorizar o que antes era descartado.

1.1 RESÍDUOS ORGÂNICOS E POLUIÇÃO

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO (2013), a produção de alimentos nos anos de 2005 e 2007, precisaria aumentar em 60% devido a previsão de crescimento mundial da população para 9,8 bilhões em 2050. Contudo, o aumento consequentemente estabelece sobre as fontes de recursos naturais maior pressão, de modo a agravar problemáticas socioambientais e econômicas. Neste sentido, de acordo com Gustavsson (2011), mundialmente são produzidos por ano cerca de 1,3 bilhão de toneladas de resíduos orgânicos, sendo estes oriundos do descarte na cadeia de produção de alimentos e do consumo final.

Neste cenário, as perdas relacionadas à produção e distribuição de alimentos podem ser observadas nas etapas de pré-colheita, coleta, armazenagem, transporte e industrialização (MARTÍNEZ et al.,2014). No que diz respeito à fase de venda, o descarte é realizado com o objetivo de entregar a qualidade e segurança legais para produtos perecíveis que, nestes casos, passaram do prazo de validade sem terem sido comercializados ou apresentarem quaisquer avarias (BUCHNER et al.,2012). Além disso, as Ceasas (Centrais de Abastecimento) que operam no Brasil como pontos de distribuição e comercialização de alimentos, também contribuem para as perdas que ocorrem na etapa de venda por atacado (MENDES, 2019).

Diante do aumento na geração de resíduos orgânicos, aliado à falta de tratamento e ao descarte inadequado desses materiais, Segundo Agência Brasil (2024), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024) apontou que, em 2023, mesmo com a vigência da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305, de 02/08/2010), que estabelece prazos para implementação de um modelo ambientalmente adequado de gestão de resíduos, 31,9% dos municípios brasileiros, utilizam lixões como destino final dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Consequentemente, a falta de manejo adequado do lixo orgânico, associada a produção em larga escala, gera processos poluentes decorrentes da decomposição natural desses compostos, que ao serem depositados nos lixões ou em outros locais inapropriados proporciona a contaminação dos lençóis freáticos pela produção de chorume bruto, que apresenta, principalmente, concentrações variadas de compostos ácidos húmicos e fúlvicos, metais pesados, matéria orgânica e nitrogenada e orgânicos clorados, bem como o biogás, composto de gases tóxicos e poluentes liberados na atmosfera como o Metano (CH_4) e o Dióxido de Carbono (CO_2), dois Gases de Efeito Estufa (GEEs) (SILVA; OLIVEIRA, 2013; PEROTTI; CAETANO, 2023).

1.2 OS BIODIGESTORES COMO SOLUÇÃO AO CENÁRIO POLUENTE

Apesar dos impactos ambientais decorrentes da digestão anaeróbica, esse processo também pode ser aproveitado como uma alternativa sustentável para o tratamento dos resíduos orgânicos com a utilização dos biodigestores, sistemas fechados que controlam o processo de biodigestão visando a produção de biogás como fonte de energia e calor e de biofertilizante para manutenção do solo (ARAÚJO et al., 2021). Ademais, a proposta dos biodigestores está alinhada ao conceito de economia circular, que visa, em vez do descarte após o uso, o reaproveitamento dos resíduos gerados. Nesse sentido, Ferreira (2020) destaca que os biodigestores representam uma alternativa atrativa de energia limpa, de forma que permitem a valorização dos resíduos orgânicos enquanto reduzem impactos ambientais.

1.3 O PROCESSO DE BIODIGESTÃO

A produção de biogás decorrente da decomposição do lixo orgânico ocorre devido a digestão anaeróbica, que ao ser realizada na ausência de oxigênio, é dividida em 4 etapas essenciais e subsequentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (AMARAL; STEINMETZ; KUNZ, 2019). Reforça Amaral, Steinmetz e Kunz (2019) que as fases da Digestão funcionam por meio da ação de bactérias específicas que metabolizam e geram produtos para as bactérias das próximas fases, deste modo a hidrólise, primeira etapa, é responsável pela quebra das moléculas dos resíduos orgânicos que apresentam muita massa como proteínas, lipídios e carboidratos em moléculas menores denominadas monômeros. Em seguida na acidogênese, as bactérias acidogênicas fermentam os monômeros em ácidos orgânicos voláteis (Como o ácido acético, propiônico, butírico), álcoois, dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2) e amônia (NH_3). Os ácidos graxos e os álcoois são convertidos em compostos mais simples na etapa de acetogênese, conseqüentemente os ácidos simples formados, mais especificamente o ácido acético que é oriundo da quebra do acetato, serão usados na metanogênese pela conversão do ácido acético (CH_3COOH) em metano (CH_4) e dióxido de Carbono (CO_2).

1.4. TEMPERATURA E pH

De acordo com Silva e Oliveira (2013) a ação das bactérias decompositoras, responsáveis pelo processo de biodigestão, são afetadas diretamente pela temperatura e pH do meio reacional. Para a produção ideal, de baixo custo energético e estabilidade operacional de biogás com bom rendimento de metano, o sistema precisa operar preferencialmente na faixa de temperatura de 20° a 40°C. Variações bruscas de temperatura devem ser evitadas, uma vez que a sua alteração pode gerar choques térmicos e inativação dos microrganismos resultando na paralisação da reação e queda na produção. Segundo Amaral, Steinmetz e Kunz (2019) o pH dos resíduos orgânicos utilizados como substrato influencia diretamente na atividade das bactérias anaeróbicas, uma vez que cada grupo bacteriano atua de forma otimizada em faixas específicas de pH. Para valores abaixo de 6,5, poderá ocorrer a inibição das bactérias na fase metanogênica, gerando o acúmulo de ácidos voláteis e o desequilíbrio do sistema. O pH ideal para a biodigestão anaeróbica situa-se entre 6,8 e 7,5. Ambientes ácidos comprometem a atividade enzimática, enquanto meios alcalinos favorecem a formação de gases como SO₂ e H₂. Nesse contexto, o monitoramento constante de pH e da temperatura é essencial para a manutenção do equilíbrio entre as etapas acidogênicas e metagênicas.

1.5 COMPOSIÇÃO E USO DO CHORUME

O chorume, também chamado de lixiviado ou chorume orgânico, como o biogás, é um dos produtos do processo de decomposição do lixo orgânico, que conforme Araújo et al. (2021) apresenta potencial de uso como biofertilizante sendo um tipo de fertilizante agrícola que contém altos níveis de macro e micronutrientes. Por estar em processo avançado de decomposição, sua incorporação ao solo torna-se mais eficiente, além de atuar como um defensivo natural, auxiliando no controle de pragas, doenças e insetos, reduzindo a necessidade do uso de agrotóxicos.

1.6 COMPOSIÇÃO E USO DO BIOGÁS

O biogás é um composto gasoso que pode ser utilizado como fonte de calor e como biocombustível devido a presença de metano (CH_4) que permite o processo de queima. (Araújo et al, 2021) Contudo, o biogás não apresenta concentração pura de metano, em sua composição, existindo parcelas de outros gases que segundo Ferraz e Marriel (1980) são metano 60%, dióxido de carbono 38%, pouco nitrogênio e hidrogênio, além de traços de ácido sulfídrico, mas é essencial destacar que essas concentrações vão variar de acordo com a composição dos substratos usados para alimentar o biodigestor. Ademais, devido a presença de outros compostos no gás, o poder calorífico do biogás impuro poderá ser em torno de 5000 a 7000 kcal/ m^3 , de modo que um 1 m^3 de biogás equivale à: 0,613 litro de gasolina; 0,579 de litro de querosene; 0,553 litro de óleo diesel; 0,454 kg de gás liquefeito de petróleo (GLP) (FERRAZ, MARRIEL E EVÓDIO,1980).

1.7 BIOMETANO: NECESSIDADE DA PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS PARA USO ADEQUADO

Deste modo, visando ampliar o potencial do biogás torna-se essencial o processo de purificação do gás para assim produzir o biometano que é a parte purificada e consequentemente com maior potencial energético que Ferraz, Marriel e Evódio (1980) analisam como 12000 kcal/ m^3 . Tendo em vista o potencial de crescimento do uso dos biodigestores como solução sustentável a produção de calor e energia, a purificação deve abranger também a segurança do uso do gás de modo o qual Bonatto et al. (2024) diz que a crescente evolução da difusão de biodigestores como fonte de energia renovável e sustentável no mercado e suas aplicações ao meio urbano e rural apresenta como principal falha o processo de queima do biogás com impurezas, ou seja com a presença de N_2 , H_2 e ácido sulfídrico (também chamado de sulfeto de hidrogênio), este último uma barreira significativa para a segurança ambiental, além de afetar os mecanismos envolvidos nas etapas de fabricação e uso do biogás. Esse composto é capaz de diminuir a vida útil dos equipamentos utilizados e é um dos responsáveis pela formação da chuva ácida após o processo de queima do biogás.

1.8 PROCESSOS DE PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

Petersson e Wellinger (2009) descrevem diferentes tecnologias de purificação do biogás, como absorção química, adsorção física e oxidação, essenciais para a obtenção de biometano. Segundo Wereko-Brobby e Hagen (2000), essas técnicas variam em eficiência e aplicabilidade conforme a composição do biogás e as condições do processo de biodigestão. Por meio de testes experimentais, Bonatto verificou que a remoção de H_2S pode ser mais efetiva com a utilização de carvão ativado. Além disso, a purificação do biogás é um processo de extrema importância para o seu uso comercial. Nesse sentido, Bonatto et al., (2018) destaca que a utilização de carvão ativado e óxido de ferro, podem ser empregados na etapa de purificação para a remoção de contaminantes como H_2S e NH_3 . E ademais, a utilização de nanopartículas de ferro pode potencializar essa etapa de purificação devido às suas propriedades reativas. Segundo Schäfer (2017) o uso de tecnologias inovadoras, como as nanopartículas, aumenta a eficiência da filtragem, tornando o processo mais sustentável.

1.8 MICROCONTROLADOR ARDUINO UNO E SENSORES

A utilização de um sistema de gerenciamento de dados é de fundamental importância para o monitoramento e controle de processos, tornando a integração de sensores e controladores uma necessidade imprescindível. O Arduino Uno é um microcontrolador de código aberto que pode ser utilizado em projetos de automação e monitoramento devido a sua versatilidade, simplicidade, baixo custo e compatibilidade com diversos sensores e atuadores, sendo responsável por coletar, processar e responder os dados dos sensores em tempo real (OLIVEIRA et al., 2018). Em aplicações como biodigestores, ele pode ser programado para monitorar parâmetros críticos, como temperatura, pH, umidade e produção de gás, utilizando sensores específicos como o MQ-4 utilizado para monitorar a presença de gás metano e o DHT22 para temperatura e umidade. Os dados internos coletados podem ser lidos como sinais analógicos e digitais, e utilizando a linguagem C/C ++, que é a base da plataforma Arduino, podem ser processados e exibidos em uma tela LCD, permitindo a visualização imediata das variáveis monitoradas (OLIVEIRA, 2023).

1.9 A ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NO UV-VIS

Outro método de análise que pode ser utilizado no monitoramento do sistema de biodigestão é a espectroscopia de absorção na região do ultravioleta e visível (UV-Vis, do inglês Ultraviolet and Visible Spectrophotometry) que permite a identificação e determinação de íons metálicos e não metálicos em baixas concentrações, por meio da formação de complexos coloridos ou absorção direta (BIELEMANN et al, 2017). Segundo BIELEMANN et al. (2017), trata-se de uma técnica de baixo custo operacional, robusta, rápida na análise, confiável nos resultados e de fácil manuseio que mede a absorção de luz por substâncias em comprimentos de onda do ultravioleta (200 - 400 nm) e do visível (400-800 nm). A substância analisada precisa absorver luz nessa faixa, diretamente ou após formar um complexo colorido, e essa absorbância é proporcional à concentração do analito, segundo a Lei de Beer-Lambert:

$$A = \epsilon \cdot b \cdot c$$

Onde:

A = absorbância;

ϵ = coeficiente de absorção molar;

b: caminho óptico;

c: concentração do analito.

1.10 APLICAÇÕES E PERSPECTIVAS DA NANOTECNOLOGIA

As partículas, em escala nanométrica (1 a 100 nm), passam a apresentar comportamentos distintos devido a alterações na organização dos átomos e na movimentação dos elétrons, isso se deve à predominância dos chamados efeitos quânticos, que surgem devido ao seu tamanho extremamente reduzido em comparação com a escala macroscópica. Como resultado, observa-se mudanças significativas nas propriedades ópticas (mudança de cor), elétricas (modificação da condutividade e dureza) e química (maior área

superficial, maior reatividade) (AQUINO et al., 2025). A nanotecnologia pode ser compreendida como o desenho e o desenvolvimento de estruturas, materiais, e dispositivos através da modificação na forma, tamanho e organização em escala nano, com a finalidade de criar novas aplicações tecnológicas (AQUINO et al., 2025). Em escala macroscópica, o óxido de ferro (como a magnetita, Fe_3O_4) apresenta comportamento magnético típico de materiais ferromagnéticos (exibe domínios magnéticos mesmo na ausência de um campo elétrico externo). Contudo, quando reduzido à escala nanométrica podem apresentar superparamagnetismo, processo de magnetização apenas na presença do campo externo. Essa propriedade, junto com a alta área superficial das nanopartículas, permite a aplicação tecnológica em diversas áreas, como na medicina, com a produção de novos medicamentos e na área ambiental na utilização de filtros para a remoção de compostos tóxicos da água e do ar, já que podem atrair e reter os poluentes de forma eficiente (SILVA, et al., 2015).

2 JUSTIFICATIVA

O crescimento da produção de resíduos orgânicos tem resultado em aumento proporcional do descarte inadequado, intensificando a emissão de gases de efeito estufa (GEEs), como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) que interferem essencialmente na Global Methane Pledge (Compromisso Global do Metano) e no Acordo de Paris definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) que visam a proteção e manutenção da vida humana alinhada com o meio ambiente por meio de práticas sustentáveis. Diante do exposto, é imprescindível o controle, análise e reformulação dos focos de geração de poluentes por meio de resíduos orgânicos.

Contudo, esses resíduos apresentam características promissoras, pois, em vez de causarem poluição, podem ser transformados em energia por meio da geração de biogás e biofertilizante a partir da digestão anaeróbica dessa matéria-prima. O biogás, produzido pela conversão da matéria orgânica, deve ser decomposto de modo a reduzir ou eliminar compostos contendo enxofre, pois a sua presença torna problemática a sua utilização em motores e geradores devido a sua ação corrosiva e tóxica, o que reduz a qualidade desse biocombustível.

Nesse contexto, o projeto BIOTEC propõe o desenvolvimento de um biodigestor inteligente, capaz de automatizar e monitorar o processo de biodigestão por meio de sensores de temperatura, umidade e volume de metano, além da análise das variáveis de pressão e pH. O sistema é Integrado a um filtro de nanopartículas de ferro adsorvidos em carvão ativado, com o objetivo de remover compostos contendo enxofre, otimizando tanto a qualidade do biogás quanto a geração do biofertilizante.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Desenvolver um biodigestor inteligente de baixo custo, equipado com um sistema de filtragem à base de nanopartículas de ferro adsorvidos em carvão ativado, visando a redução de compostos sulfurados do biogás.

3.2 Objetivos específicos

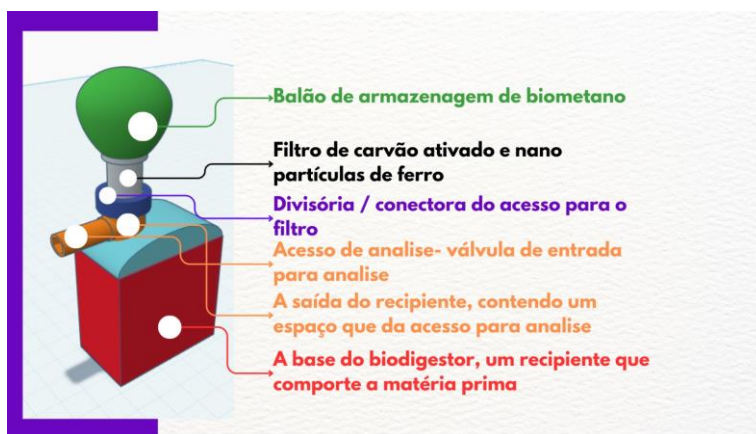
- Desenvolver um biodigestor inteligente, utilizando um microcontrolador do tipo Arduino UNO e sensores, para monitorar e otimizar o processo de digestão anaeróbica de resíduos orgânicos provenientes da Ceasa de Salvador.
- Elaborar um sistema de filtragem equipado com um suporte estrutural produzido de polímero PLA (plástico biodegradável sintético feito de ácido polilático) acoplado com nanopartículas de ferro adsorvidas em carvão ativado.
- Realizar a caracterização das nanopartículas de ferro sintetizadas por meio da quantificação da concentração de ferro (Fe) utilizando espectrofotometria por UV-VIS.
- Analisar a presença e concentração de enxofre (s) no biogás depois da filtração, utilizando espectrofotometria UV-VIS, para validar a eficiência do filtro de nanopartículas na purificação do biogás.
- Analisar a composição de biofertilizante residual, com foco na presença de nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K).

4 METODOLOGIA

O biodigestor inteligente foi desenvolvido com o objetivo de estudar tanto o processo de biodigestão quanto a viabilidade de um modelo de baixo custo, além de avaliar a eficácia do filtro de nanopartículas integrado ao sistema.

Para alcançar o primeiro objetivo específico, onde queremos “Desenvolver um projeto de biodigestor inteligente, utilizando um microcontrolador do tipo Arduino UNO e sensores, para monitorar e otimizar o processo de digestão anaeróbica de resíduos orgânicos provenientes da Ceasa de Salvador.”, foi elaborado um modelo inicial, acompanhado de um croqui que serve como guia para a arquitetura do projeto. Em seguida, passamos para a plataforma Tinkercad, onde construímos uma projeção visual do biodigestor, definindo como deve ser a estrutura e quais são os pontos principais de instalação dos sensores e do microcontrolador, gerando um esboço digital do que viria a ser o equipamento real como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Fotografia da modelagem 3D do Biodigestor

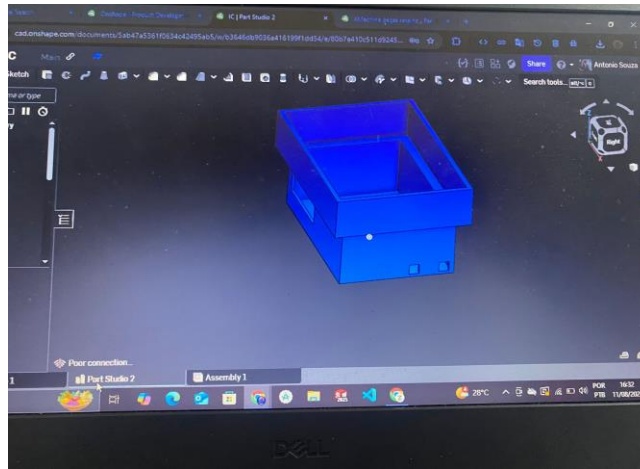


Fonte: Autoral (2025)

Paralelamente a isso, também desenvolvemos uma base encaixável, localizada logo abaixo do biodigestor (Figura 2), destinada a abrigar os circuitos eletrônicos de forma organizada e protegida. A base foi inicialmente projetada no Tinkercad e, posteriormente levada para o

para a plataforma de desenvolvimento Onshape, e fabricada por meio de impressão 3D, garantindo precisão e resistência.

Figura 2 – Fotografia da modelagem 3D da Base do biodigestor



Fonte: Fonte: Autoral (2025)

4.1 Montagem do Biodigestor

Para a construção do Biodigestor Biotec foram utilizados os seguintes elementos:

- 1 UNI. Galão de 5 litros de PET (polietileno tereftalato);
- Tubo de PVC (para direcionamento do gás);
- Massa durepox (Utilizada para vedação);
- Silicone (Utilizado também para vedação);
- 1 UNI. Manômetro (Para medir a pressão interna);
- 1 UNI. Bexiga.

O primeiro passo da montagem é definir as medidas de encaixe dos sensores, entradas de fios e tubulações no Galão de 5 litros, realizando cortes na superfície e encaixando os sensores MQ-4 (Metano) e DHT22 (AM2302) (Temperatura e Umidade) bem como o Manômetro. Em seguida inserimos o tubo de saída do biogás com a bexiga acoplada e o manômetro como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Fotografia do Biodigestor Biotec em funcionamento



Fonte: Autoral (2025)

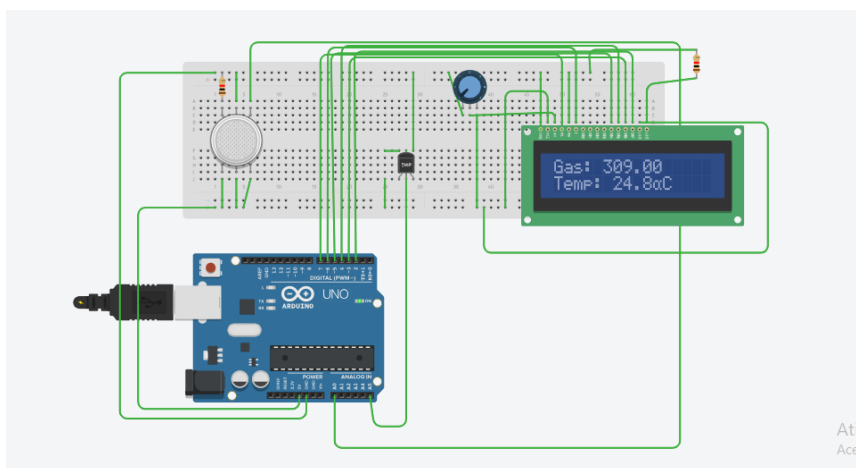
4.2 Montagem do sistema eletrônico

Após a instalação dos sensores no biodigestor, torna-se necessário programar o código que será executado pelo microcontrolador e realizar a conexão com a plataforma Arduino UNO. Para a execução dessa etapa, foram necessários os seguintes procedimentos e componentes:

- 1 UNI. Microcontrolador Arduino UNO;
- 1 UNI. Tela LCD 16x2;
- 1 UNI. Sensor de Metano MQ-4;
- 1 UNI. Sensor de Temperatura e Umidade DHT22 (AM2302);
- Jumpers Macho-Fêmea;
- 1 UNI. Potenciômetro
- 1 UNI. Resistores

Inicialmente, foi realizada a prototipagem virtual por meio da plataforma Tinkercard, conforme ilustrado na Figura 4. Nessa etapa, foi desenvolvido e testado um modelo simplificado do sistema de sensores, permitindo validar a lógica de funcionamento antes da implementação física.

Figura 4 – Fotografia do modelo digital do Arduino



Fonte: Autoral (2025)

Nas Figura 5 e 6, é possível observar a conexão dos sensores aos fios e, posteriormente, ao microcontrolador Arduino UNO, possibilitando a ativação e o pleno funcionamento do sistema. Para essa etapa, foram utilizados o sensor de gás metano MQ-4 e o sensor de temperatura e umidade DHT22 (AM2302), ambos posicionados no interior do biodigestor com o objetivo de monitorar as condições ambientais do meio. Os dados coletados são enviados a uma tela LCD instalada externamente, permitindo a visualização em tempo real das medições realizadas.

O funcionamento do sensor MQ-4 baseia-se na utilização de um material sensível que sofre alterações em suas propriedades quando expostos a diferentes concentrações do gás a ser detectado, neste caso, o metano presente no biodigestor. O componente ativo do sensor é o óxido de estanho (SnO_2), cuja resistência elétrica varia conforme a concentração de

metano no ambiente. Essa variação de resistência resulta em uma mudança na tensão de saída do sensor, permitindo a medição da concentração de metano em partes por milhão (ppm).

Já o DHT22 também opera com base em um princípio semelhante, no qual as medições são obtidas a partir da variação da resistência de um material condutor. Essa resistência é alterada conforme as mudanças nas condições de temperatura e umidade do ambiente. Para a medição de temperatura, o sensor utiliza um termistor, enquanto a umidade é detectada por meio de um componente capacitivo, permitindo assim a obtenção de valores numéricos precisos.

Figura 5 e 6 – Fotografias da conexão dos sensores MQ-4 e DHT22 ao Arduino UNO e sua integração ao sistema do biodigestor.



Fonte: Autoral (2025).

A etapa de instrumentação do sistema Arduino UNO é o momento central da automatização do biodigestor, pois permite o monitoramento contínuo das variáveis críticas do processo de digestão anaeróbica. Por isso, uma etapa muito importante foi a programação do sensor de metano, conforme apresentado na Figura 7. Isso se deve ao fato de que, para

realizar leituras precisas, o sensor necessita de medições periódicas em ar limpo, o que, no caso de um biodigestor, torna-se inviável, já que não é possível removê-lo constantemente para calibração.

Dessa forma, utilizou-se um artifício da programação: a medição da tensão elétrica detectada pelo sensor de metano. Com isso, a concentração de metano é calculada com base em um valor de referência previamente conhecido para o ar limpo, permitindo estimar adequadamente o nível de metano do ambiente, mesmo sem a necessidade de exposição direta ao ar puro.

Figura 7 – Fotografia do fragmento da Programação dos Sensores e do Display LCD

```
sketch_oct18a.ino
26 const float A = 5500.0;
27 const float B = -2.25;
28
29 // CONFIGURAÇÃO DO DHT22
30 #define DHTPIN 10
31 #define DHTTYPE DHT22
32 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
33
34
35 void setup() {
36   Serial.begin(9600);
37
38   // **INICIALIZAÇÃO DO LCD**
39   lcd.begin(16, 2); // Define o tamanho do LCD (16 colunas e 2 linhas)
40
41   // Mensagens de inicialização no LCD
42   lcd.print("Monitor Biodigestor");
43   lcd.setCursor(0, 1);
44   lcd.print("MQ-4 e DHT22");
45
46   dht.begin(); // Inicializa o sensor DHT22
47
48   Serial.println("-----");
49   Serial.println("MQ-4 (Manual) e DHT22: Monitoramento de Biodigestor");
50   Serial.print("RL de Carga: ");
51   Serial.print(RL);
52   Serial.println(" kΩ");
53   Serial.print("R0 de Referência (Fixo): ");
54   Serial.print(R0_calibrado);
55   Serial.println(" kΩ");
56 }
```

Fonte: Autoral (2025)

A prototipagem da placa foi realizada utilizando fios do tipo macho e fêmea, além de resistores, que garantem que as conexões estejam estáveis e seguras entre os componentes. Com essa configuração, foi possível integrar a coleta automatizada de dados ao

funcionamento do biodigestor, reforçando sua proposta de automação inteligente e otimização do processo.

4.3 Montagem do Sistema Inteligente:

Para testar a eficácia do sistema, foi necessário realizar a biodigestão no biodigestor. Os reagentes e materiais utilizados nessa etapa foram:

- 100 gramas de banana da prata com casca
- 200 gramas de esterco bovino da marca Terral
- 300 mL de água destilada
- Béqueres de 300 mL
- Bastões de vidro
- Pistilo e Almofariz
- Placas de Petri
- Balança Analítica

Deste modo, foram pesados 100 gramas de banana com casca, utilizando uma balança analítica. Em seguida, toda a banana foi amassada com o auxílio de pistilo e almofariz até atingir uma consistência pastosa (Figura 8), com o objetivo de facilitar a ação das bactérias sobre a matéria orgânica. Após esse processo, a banana foi transferida para uma placa de Petri.

Em seguida, foram pesados 200 gramas de esterco bovino com o auxílio da balança analítica, divididos em dois béqueres de 100 ml cada (Figura 9). O esterco foi então misturado a banana e água destilada até alcançar uma consistência pastosa. Essa mistura foi inserida no biodigestor, que foi fechado com o sistema de filtragem acoplada ao cano e a um balão, sendo posteriormente vedado com massa Durepoxi.

Figura 8 - Fotografia da pesagem e preparação da banana com casca amassada



Fonte: Autoral (2025)

Figura 9 - Fotografia da pesagem do esterco Bovino



Fonte: Autoral (2025)

4. 4 Análise Estatística do Sistema de Monitoramento do Biodigestor

A análise dos dados experimentais coletados nos dias 20 e 25 de agosto de 2025 nos permitiu demonstrar, de forma fundamentada, que o biodigestor em operação apresenta comportamento produtivo e coerente com o esperado. Além de evidenciar o aumento gradual da produção de metano (CH_4). Em pouco dias, os resultados confirmam também a confiabilidade do sistema de monitoramento desenvolvido com Arduino, utilizando os sensores MQ-4 e DHT22, cuja calibração e resposta mostraram-se consistentes ao longo das medições como demonstra a tabela abaixo.

Tabela 1 - Dados coletados no biodigestor Biotec

Dia	Temperatura Média (°C)	Umidade Média (%)	CH_4 Médio (ppm)	Desvio Padrão Temperatura	Desvio Padrão Umidade	Desvio Padrão CH_4
20/08/25	22,97	94,12	17,47	0,05	0,09	0,20
25/08/25	25,23	94,39	25,98	0,04	0,06	1,59

Fonte: Autoral (2025)

Durante o primeiro dia de monitoramento (20/08/2025), a temperatura média registrada foi de $22,97^\circ\text{C} \pm 0,05$, enquanto a umidade apresentou média de $94,12\% \pm 0,09$, valores que indicam estabilidade térmica e higrométrica no interior do biodigestor. Esses dados revelam a precisão do sensor DHT22, que demonstrou baixa variação nas leituras, sem oscilações anômalas ou interferências aparentes. A concentração média de metano, medida pelo sensor MQ-4, foi de $17,47 \text{ ppm} \pm 0,20$, valor compatível com o início do processo de digestão anaeróbica, momento em que a atividade microbiana ainda se encontra em fase de adaptação ao substrato orgânico. Em comparativo, alguns dias depois, na coleta (25/08/2025), observou-se uma elevação significativa da temperatura média para $25,23^\circ\text{C} \pm 0,04$, representando um aumento de aproximadamente 9,8%, enquanto a umidade manteve-se praticamente constante ($94,39\% \pm 0,06$). A variável que apresentou maior variação foi a concentração de metano, que atingiu $25,98 \text{ ppm} \pm 1,59$, correspondendo a um aumento de 48,7% em relação ao valor inicial. Esse crescimento acentuado evidencia o avanço do

processo metanogênico e demonstra que o sensor MQ-4 é sensível e capaz de responder de forma precisa às variações reais na produção de biogás.

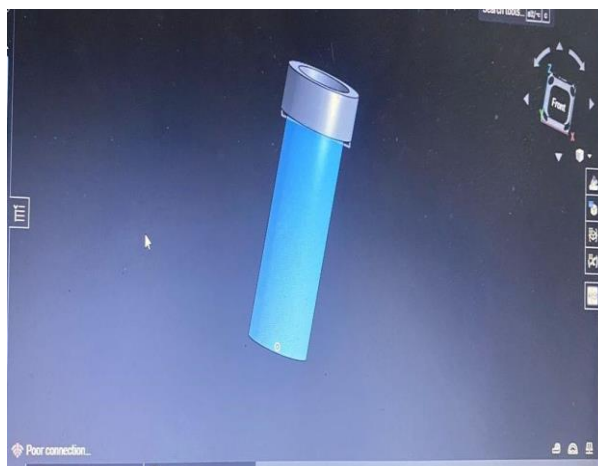
Esses primeiros resultados já foram suficientes para comprovar que tanto os sensores quanto o código implementado no Arduino estavam funcionando adequadamente, garantindo medições confiáveis e coerentes com o comportamento físico-químico esperado de um biodigestor a nível de bancada, ativo. O baixo desvio padrão observado nas medições de temperatura e umidade reforça a estabilidade do sistema de aquisição de dados, enquanto a variação natural nas leituras de CH_4 confirmam a evolução metabólica do meio. Assim, desde os cinco primeiros dias de observação, já foi possível identificar uma tendência clara de aumento na produção de metano, indicando a funcionalidade plena do conjunto experimental. Cabe destacar que o processo de monitoramento não se encerrou nessas medições iniciais. O biodigestor continua em operação nos dias subsequentes, com a coleta contínua de dados, de modo a acompanhar o comportamento do sistema ao longo do tempo. Esse acompanhamento prolongado foi essencial para compreender a evolução completa do processo de digestão e para estabelecer o ponto de maior eficiência produtiva do biodigestor. Condição fundamental para a etapa seguinte do projeto, que consiste na testagem e avaliação do filtro de purificação, o qual será analisado sob as condições de uma boa produção de metano.

4.5 PRODUÇÃO DO SISTEMA DE FILTRAGEM DE NANOPARTÍCULAS E ÁCIDO POLILÁTICO (PLA)

Para alcançar o segundo objetivo específico, onde queremos “Elaborar um sistema equipado com um suporte estrutural produzido de polímero PLA (plástico biodegradável sintético feito de ácido polilático) acoplado com nanopartículas de ferro adsorvidas em carvão ativado.”, começamos projetando no Tinkercad uma pequena estrutura em formato cilíndrico, semelhante a um copo, que serve como suporte para o filtro. Esse projeto digital foi detalhado de modo a incluir pequenos furos de aproximadamente 2 cm, permitindo a passagem do gás e a fixação adequada do material filtrante. Após finalizado, o modelo foi refinado no software Onshape (Figura 10) e impresso em 3D utilizando PLA (Figura 11), o mesmo material

biodegradável já empregado na base do biodigestor, garantindo uniformidade no projeto. Em paralelo, realizamos a produção das nanopartículas de ferro (Fe_3O_4) superparamagnéticas adsorvidas em carvão vegetal ativado comercial (Figura 12), por meio do método de coprecipitação, com adaptações baseado no trabalho de SCHÄFER (2017).

Figura 10 - Fotografia do filtro em PLA refinado no Onshape



Fonte: Autoral (2025)

Figura 11 - Fotografia do filtro em PLA impresso em 3D



Fonte: Autoral (2025)

Figura 12 - Fotografia das nanopartículas de ferro (Fe_3O_4) superparamagnéticas adsorvidas em carvão vegetal ativado comercial sintetizadas



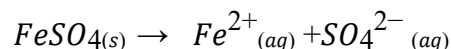
Fonte: Autoral (2025)

Para a sua produção, foram utilizados os seguintes reagentes e materiais:

- Água destilada (para preparação das soluções);
- Sulfato de ferro heptahidratado (II) – $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Marca Êxodo Científica).
- Hidróxido de sódio – NaOH (Marca Êxodo Científica).
- Carvão vegetal ativado comercial em pó;
- Béqueres de 500 mL e 250 mL;
- Agitador magnético (para homogeneização das soluções)
- Papel indicador de pH;
- Funil (para auxiliar a filtragem);
- Banho Maria digital (para aquecimento);
- Balança de precisão (para pesagem dos materiais)
- Imã (para análise do campo magnético)

Desse modo, o primeiro passo para sua síntese foi adicionar 100ml de água ^{destilada} em um béquer de 100 mL. Em seguida, foram adicionados 11,4 gramas de sulfato de ferro

heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), que se dissolveu na água, liberando íons de ferro (Fe^{2+}) e íons sulfato (SO_4^{2-}). A sua equação química é expressa por:



Esse processo é necessário para separar os íons de ferro (Fe^{2+}) do meio contendo sulfato. Em seguida, adicionam-se gradualmente 16,2 gramas de hidróxido de sódio (NaOH) à solução aquosa, até que o pH atinja aproximadamente 11. Esse ajuste visa criar um meio básico, para a redução dos íons Fe^{2+} a ferro metálico (Fe^0).

Durante esse processo, observa-se a turvação da solução, o que indica a formação de nanopartículas de ferro. Para aumentar a eficiência da reação, a mistura é submetida a agitação magnética por 5 minutos, o que acelera a formação das nanopartículas.

Após essa etapa, adiciona-se o carvão ativado à mistura, como o objetivo de promover a incorporação das nanopartículas de ferro a sua superfície. Essa reação ocorre sob aquecimento, a uma temperatura de 97,3 °C, durante 20 min.

Por fim, a solução é deixada em repouso, permitindo que até que a mistura de nanopartículas e carvão ativado se precipite no fundo do béquer, devido a sua baixa solubilidade em água.

Uma vez sintetizado e incorporado ao carvão ativado, o material será cuidadosamente colocado dentro da estrutura de PLA, criando um filtro funcional que, posteriormente, será acoplado à saída superior do biodigestor. Dessa forma, consolidamos a etapa de possível purificação do biogás, assegurando maior eficiência e qualidade ao processo.

4. 6 ANÁLISES E AVALIAÇÃO DO SISTEMA

4.6.1 Magnetização

A caracterização magnética foi realizada empregando-se um ímã de neodímio e aproximando-o das amostras sólidas com o objetivo de verificar a presença do campo magnético.

4.6.2 Análise da presença de íons ferro (Fe^{2+}) no filtro de nanopartículas adsorvida em carvão vegetal ativado por Espectrofotometria UV-VIS

Para alcançar o terceiro objetivo específico, onde queremos “Realizar a caracterização das nanopartículas de ferro sintetizadas por meio da quantificação da concentração de ferro (Fe) utilizando espectrofotometria por UV-VIS.”, foi necessária a preparação prévia dos materiais, utilizando-se uma adaptação do método 3005A de digestão ácida estabelecidos por Rohrbough et al. Esse procedimento envolve a dissolução da matriz sólida com o uso de ácidos fortes, como HCl, permitindo a liberação dos íons metálicos em solução para posterior análise.

Com o objetivo de elaborar a curva de calibração do íon Fe^{2+} , foi preparada uma solução estoque a partir do sulfato ferroso (FeSO_4), dissolvido em água deionizada em balão volumétrico. A partir dessa solução, prepararam-se soluções padrão com concentrações crescentes (1 mg/L, 2 mg/L, 3 mg/L, 4 mg/L, 5 mg/L) utilizando balões volumétricos e volumes proporcionais da solução original.

O pH das soluções foi ajustado dentro da faixa de 3 a 6, empregando solução tampão de acetato de sódio, buscando-se um valor ideal de 4,8. Na sequência, adicionou-se cloridrato de hidroxilamina a 5% com a finalidade de reduzir possíveis íons Fe^{+3} , seguido da adição de orto-fenantrolina a 0,10%, que promoveu a formação de um complexo colorido alaranjado, adequado à análise espectrofotométrica.

As soluções foram completadas com água deionizada até o volume final e homogeneizadas cuidadosamente. Uma solução branca foi preparada como controle, seguindo o mesmo procedimento, mas sem a adição do Fe^{2+} . As análises foram realizadas através do equipamento de espectrofotometria UV-VIS, da marca KASVI, operando no comprimento de onda de 510 nm.

4.6.3 Análise do filtro de nanopartículas de ferro adsorvidas em carvão vegetal ativado por Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

A análise por espectroscopia na região do infravermelho foi realizada em parceria com o SENAI CIMATEC em um equipamento de espectrômetro Nicolet IS10 Thermo Scientific, a temperatura ambiente de 24 °C, num range de 500 – 4000 cm^{-1} .

4.6.4 Análise da presença de enxofre presente no filtro de nanopartículas após a passagem do biogás por Espectrofotometria UV-VIS.

Para alcançar o quarto objetivo específico, onde desejamos: “Analisar a presença e concentração de enxofre (s) no biogás após a filtração, utilizando espectrofotometria UV-VIS, para validar a eficiência do filtro de nanopartículas na purificação do biogás, especificamente para a remoção do gás H_2S .”,

Foram realizados testes de remoção de H_2S do biogás, conduzindo-se o fluxo gasoso por uma estrutura de PLA preenchida com material adsorvente, sob temperatura ambiente e pressão de 1 atm. Espera-se que o sulfeto de hidrogênio adsorvido na superfície do filtro reaja com as nanopartículas de ferro, formando sulfeto de ferro e água. Em seguida, o material retido é submetido à análise por espectrofotometria UV-VIS, utilizando uma metodologia adaptada conforme Bielemann et al. (2017).

Para a calibração do equipamento foi preparada uma solução estoque de sulfato com concentração de 1000 mg/l, a partir da dissolução de sal sulfato de sódio em água deionizada, elabora-se a curva de calibração para a análise, utilizando concentrações que variam de 5, 10, 20, 40 e 60 mg/l, obtidas a partir da solução estoque.

Durante o preparo das soluções padrão, foram adicionados 5 mL cloreto de bário a 10% (m/v) e 2 mL de ácido clorídrico 0,5 mol/l, da marca Êxodo Científica, reagentes utilizados para promover a formação do precipitado necessário à análise.

Após a passagem do biogás, o filtro contendo sulfeto de ferro (FeS) foi submetido a uma digestão oxidativa, utilizando uma solução oxidante apropriada (HNO_3), com o objetivo de converter o enxofre presente em íons sulfato. A solução resultante será então analisada por espectrofotometria UV-VIS, por meio da adição de cloreto de bário 10% (m/v) e ácido

clorídrico 0,5 mol/l, que promovem a formação de um precipitado de sulfato de bário (BaSO_4). A turbidez gerada é comparada a uma curva de calibração previamente elaborada com concentrações de 5 a 60 mg/l de sulfato, permitindo a quantificação do enxofre adsorvido no filtro. As análises serão realizadas através do equipamento de espectrofotometria UV-VIS, da marca KASVI, operando no comprimento de onda de 420 nm.

4.6.5 Análise do biofertilizante quanto a presença de macronutrientes NPK.

Para finalizar, o quinto e último objetivo, onde buscamos: “Analisar a composição de biofertilizante residual, com foco na presença de nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K).”, foi realizada por método colorimétrico, através de um kit químico da marca wancheng, modelo Soil Test kit. As amostras (1 mL cada) foram previamente diluídas em água deionizada, em três tubos de ensaio. As soluções foram agitadas e colocadas em repouso por 30 minutos. Após esse tempo, o sobrenadante foi coletado e, em seguida, adicionaram-se duas gotas de cada reagente específico do kit. A intensidade da coloração formada foi comparada com uma escala padrão, permitindo a estimativa da concentração de cada nutriente.

4.6.6 Análise do pH

O pH das amostras de chorume obtido no biodigestor foi determinado utilizando o método colorimétrico, conforme indicado no Kit químico Soil Test da marca Wancheng. Para a preparação das amostras, foi adicionado 1 mL de chorume a 2/3 de água deionizada em um tubo de ensaio. A solução foi agitada e deixada em repouso por 30 minutos. Após esse tempo, o sobrenadante foi coletado e, em seguida, adicionaram-se duas gotas de cada reagente fornecido no Kit. A coloração resultante foi comparada com a escala padrão, permitindo a determinação do valor do pH do chorume.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Com a intenção de produzir um material capaz de adsorver o sulfeto de hidrogênio e reagir com o filtro formado de nanopartículas de ferro adsorvido em carvão ativado comercial, formando sulfeto de ferro e água, o filtro foi sintetizado pelo método de coprecipitação. Sua caracterização foi realizada por magnetização, espectroscopia na região do Ultravioleta/Visível (UV/VIS) e espectroscopia na região do infravermelho (FTIR).

A análise da composição dos nutrientes gerados no biodigestor, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) foi realizada por meio do método colorimétrico, utilizando o kit químico Soil Test da marca Wancheng. Além disso, o pH das condições de reação no biodigestor também foi determinado com o mesmo método.

5.1 Magnetização

A amostra de nanopartículas adsorvidas em carvão sintetizadas pelo método de coprecipitação apresentou eficiente atração pelo campo magnético de um ímã de neodímio, podendo então ser utilizada em experimentos envolvendo isolamento do sólido por imantação (ver Figura 12).

Figura 12 - Fotografia da força magnética exercida pelas nanopartículas de ferro (Fe_3O_4) adsorvidas em carvão vegetal ativado.

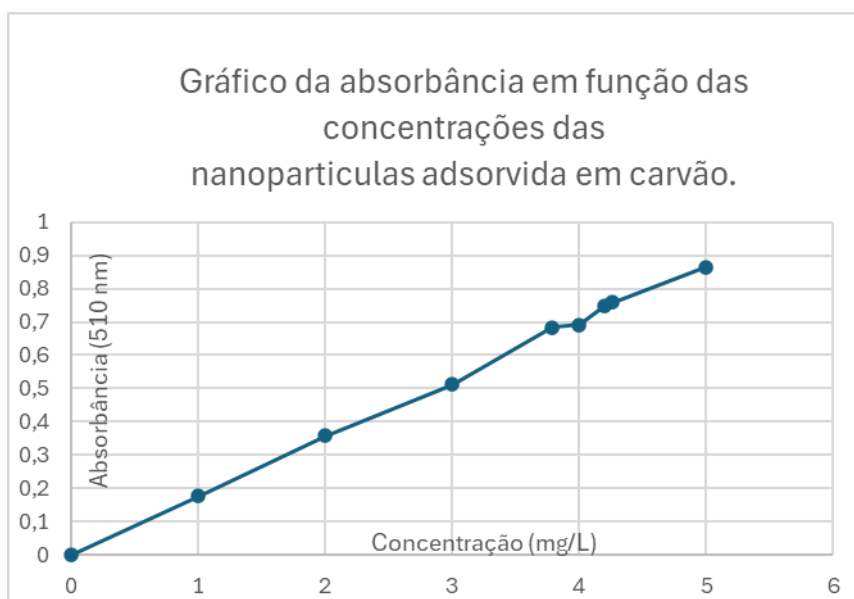


Fonte: Autoral (2025)

5.3 Análise da presença de íons ferro (Fe^{2+}) no filtro de nanopartículas adsorvida em carvão vegetal ativado por Espectrofotometria UV-VIS

O gráfico da absorbância em função das concentrações das nanopartículas adsorvidas em carvão é apresentado na Figura 13. O gráfico foi construído com base nos valores de absorbância obtidos por meio da análise espectrofotométrica em diferentes concentrações de ferro (1 mg/L, 2 mg/L, 3 mg/L, 4 mg/L, 5 mg/L) medida no comprimento de onda de 510 nm (nanômetros).

Figura 13 - Gráfico da absorbância e função das concentrações das nanopartículas adsorvida em carvão.



Fonte: Autoral (2025)

Os dados médios das amostras 01, 02 e 03 das amostras sugerem que a concentração equivalente de íons Fe^{2+} analisada foi $4,08 \pm 0,26$. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Concentrações de Fe^{2+} em nanopartículas de ferro adsorvida em carvão ativado após decomposição em frasco fechado utilizando HNO_3 e determinação por espectrofotometria UV-Vis ($n = 3$).

Amostra	Concentração (mg/L)	Absorbância (510 nm)
1	1,000	0,177
2	2,000	0,358
3	3,000	0,512
01	3,790	0,684
4	4,000	0,691
02	4,198	0,748
03	4,265	0,759
5	5,000	0,864

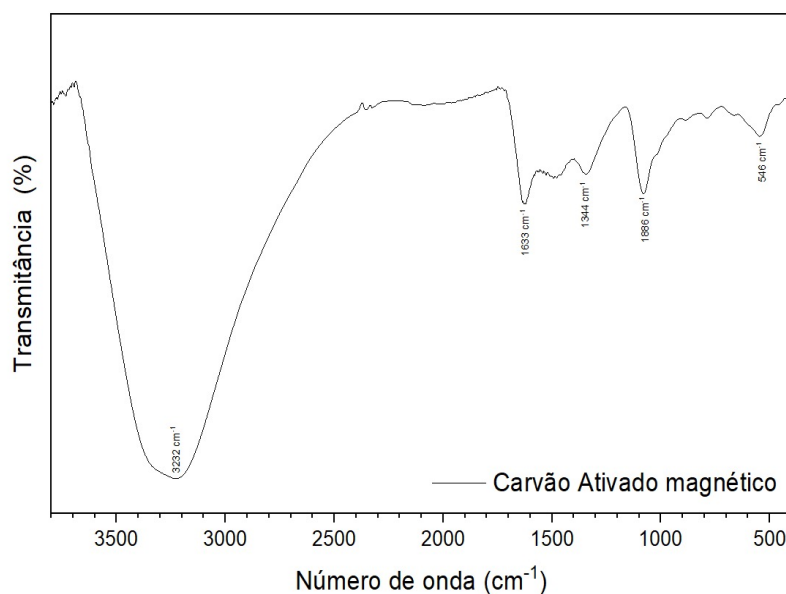
Fonte: Autoral (2025)

Os resultados obtidos demonstram que as amostras 01, 02 e 03 o carvão realmente adsorveu as nanopartículas de ferro, pois foram detectadas concentrações próximas entre si (média = 4,08 mg/L). O desvio padrão foi baixo (0,26 mg/L), indicando boa homogeneidade do material.

5.4 Análise do filtro de nanopartículas de ferro adsorvidas em carvão vegetal ativado por Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

A análise dos grupos superficiais presentes no carvão ativado magnético realizada por FTIR é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Espectroscopia por infravermelho do carvão ativado magnético



Fonte: Autoral (2025)

Na Figura 14 temos o espectro que compreende o carvão ativado magnético, o qual apresenta uma banda em 3232 cm⁻¹, que mostra a presença de grupos hidroxila (-OH) ou moléculas de H₂O adsorvidas no material, bem como em 1633 cm⁻¹ indica a presença de ácidos carboxílicos (COOH). As bandas em 1344 e 1886 cm⁻¹ indicam a presença de carbonilas (C=O) pela estrutura, enquanto em 615 cm⁻¹ é originada por vibrações de Fe-O do grupo Fe₃O₄, confirmando sua incorporação ao carvão ativado (GUIDOLIN, 2023).

5.5 Análise da presença de enxofre presente no filtro de nanopartículas adsorvido em carvão ativado após a passagem do biogás por Espectrofotometria UV-VIS.

Como mencionado anteriormente, o método de decomposição utilizando HNO_3 foi escolhido para a decomposição das amostras do filtro após a passagem do biogás, com o objetivo de determinar o enxofre (S) por espectrofotometria UV-VIS.

A presença de enxofre foi observada, com concentrações próximas (média = 26,94 mg/L) e o desvio padrão foi baixo (0,10 mg/L). Esses dados sugerem que o filtro de carvão magnético pode ser eficaz para a remoção do enxofre presente no biogás, possivelmente na forma de sulfeto de ferro. Para uma maior confiança nos resultados, análises adicionais podem ser realizadas, como difração de raios X (DRX), fluorescência de raios (FRX) ou microscopia eletrônica de varredura (MEV).

5.6 Análise do biofertilizante quanto a presença de macronutrientes NPK.

A análise dos nutrientes foi realizada por meio de testes colorimétricos, nos quais a intensidade da coloração desenvolvida em cada amostra foi comparada visualmente com uma escala padrão fornecida pelo fabricante do kit de análise. Essa comparação permitiu estimar, de forma semi-quantitativa, a concentração de cada nutriente presente nas amostras.

A Figura 15 apresenta os resultados obtidos por meio da análise colorimétrica dos nutrientes. Cada amostra reagiu com o reagente específico, desenvolvendo uma coloração característica cuja intensidade varia conforme a concentração do nutriente presente.

Figura 15 - Fotografias das análises dos nutrientes e pH por meio de testes colorimétricos



Fonte: Autoral (2025)

Com base na intensidade da coloração observada e na correspondência com a escala padrão, foram estimadas as concentrações dos nutrientes conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Estimativa da concentração de nutrientes com base na escala colorimétrica

Nutriente	Intensidade da coloração	Cor correspondente	Concentração estimada (mg/L)
Nitrogênio (NH ₃)	Fraca	Verde-claro	10
Fósforo (P)	Forte	Rosa-claro	120
Potássio (K)	Forte	Verde-escuro	240

Fonte: Autoral (2025)

A análise do biofertilizante produzido a partir do chorume da banana com casca revelou uma composição nutricional com teores significativos de fósforo (120 mg/L) e potássio (240 mg/L), além de 10 mg/L de nitrogênio na forma de amônia. Esses resultados, segundo a Embrapa (2006), indicam um produto com elevado potencial para aplicação em

fases específicas do desenvolvimento vegetal, especialmente durante a floração, frutificação e maturação, quando a demanda por P e K é naturalmente maior.

O chorume da banana com casca, rico em matéria orgânica e nutrientes essenciais, favorece a liberação gradual desses micronutrientes, especialmente o potássio e fósforo. O alto teor de potássio favorece a qualidade dos frutos, o fortalecimento dos tecidos vegetais e a resistência a estresses hídricos e bióticos. Já a presença expressiva de fósforo contribui para o bom desempenho reprodutivo das plantas. A presença de nitrogênio, mesmo em menor concentração, complementa o fortalecimento básico desse nutriente essencial.

De acordo com a Embrapa (2006), os biofertilizantes devem ser utilizados como complemento à adubação, oferecendo nutrientes de forma gradual e favorecendo o equilíbrio biológico do solo. Neste sentido, este produto pode ser usado de forma estratégica, associado a fontes adicionais de nitrogênio, especialmente nas fases iniciais do cultivo.

5.7 Análise do pH

A determinação visual do pH, observada na Figura 15, está descrito na Tabela 4.

Tabela 4. Estimativa do valor de pH com base na escola colorimétrica

pH	Intensidade da coloração	Cor correspondente	Valor
PH medido após 30 segundos de contato com a amostra	Forte	Verde-claro	9

Fonte: Autoral (2025)

O pH igual a 9 indica que o biofertilizante se encontra na fase de metanogênese do processo anaeróbico. Nessa etapa, os microrganismos metanogênicos convertem os ácidos graxos e o hidrogênio produzidos nas fases anteriores em metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), ao mesmo tempo em que o pH tende a se estabilizar ou subir, tornando-se alcalino.

De acordo com a Embrapa (2006), esse pH alcalino é típico de uma fermentação completa, indicando que o biofertilizante pode estar pronto para ser utilizado, desde que

sejam avaliados outros parâmetros, como estabilidade, presença de nutrientes e ausência de patógenos.

6 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste projeto permitiu a criação e simulação de um sistema inteligente de biodigestão anaeróbica, voltado para o reaproveitamento de resíduos orgânicos comuns em ambientes como a Ceasa, exemplificados por bananas com casaca descartadas. O biodigestor Biotec equipado com sensores e controlado por Arduino UNO demonstrou eficiência no monitoramento e controle dos parâmetros essenciais do processo, como temperatura, pH e produção de biogás.

Além disso, a síntese de nanopartículas de ferro adsorvidas em carvão ativado foi realizada com sucesso e caracterizada por espectrofotometria UV-VIS e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), comprovando a efetiva adsorção de nanopartículas magnéticas no cartão ativado. Os testes por UV-VIS também confirmaram a eficácia deste material na remoção de compostos sulfurados (H_2S) do biogás, resultando em um combustível mais puro e energeticamente eficiente.

O biofertilizante gerado a partir do chorume da banana com casca apresenta-se como uma excelente alternativa para uso em cultivos que exigem maior aporte de fósforo e potássio, contribuindo para a nutrição equilibrada das plantas e para a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola.

Os resultados indicam que o sistema integrado possui viabilidade técnica e ambiental, contribuindo para o manejo sustentável de resíduos orgânicos urbanos e alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial os ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis).

Como perspectiva futura, a realização de análises adicionais, como Difração de Raios X (DRX) para análise estrutural, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para observação morfológica e Fluorescência de Raios X (FRX) para a determinação da composição elementar, além de avaliações microbiológicas e testes agrônômicos, poderá ampliar ainda mais o conhecimento sobre o biofertilizante e o biogás produzidos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASIL. **Municípios brasileiros ainda despejam resíduos sólidos em lixões.** Agência Gov, 28 nov. 2024. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202411/munic-2023-31-9-dos-municipios-brasileiros-ainda-despejam-residuos-solidos-em-lixoes>. Acesso em: 18 out. 2025.
- AQUINO, A. A.; CASTRO, A. J. R.; SARAIVA, G. D.; ALMEIDA, C. A. S. **Divulgando a nanociência e a nanotecnologia no ensino médio à luz da aprendizagem significativa.** Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista – ENCITEC, v. 15, n. 2, p. 177–194, 2025.
- AMARAL, A. C.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. **O processo de biodigestão.** In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. (org.). *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. Concórdia: SBERA: Embrapa Suínos e Aves, 2019. cap. 1, p. 13–25.
- ARAÚJO, T. G. P.; MORAIS, F. T. L.; SANTOS, J. V. I.; LISBOA, A. C. C.; LIMA JÚNIOR, A. C.; ABREU, A. K. F.; ARRUDA, M. D.; MOURA, J. L. J.; FARIAS, B. J. P.; SILVA, R. A. V. **Avaliação de protótipo biodigestor como alternativa de tratamento dos resíduos de origem animal.** In: *Agricultura e agroindústria no contexto do desenvolvimento rural sustentável*. [S.l.: s.n.], 2021. cap. 4, p. 70–81.
- BIELEMANN, K. M. et al. **Determinação de enxofre em shampoo por espectrofotometria UV-Vis: avaliação de métodos de preparo de amostras.** Revista Brasileira de Pesquisa em Alimentos, v. 8, n. 2, p. 38–47, 2017.
- BONATTO, I. C.; SANTOS, A. A.; PEREIRA, R. S.; MOURA, T. V. **Remoção de H₂S de biogás por adsorção em carvão ativado granular e óxido de ferro.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 29, e2023135, p. 1–11, 2024.
- BUCHNER, B. C.; FISCHLER, E.; GUSTAFSON, J.; REILLY, G.; RICCARDO, C.; RICORDI, U.; VERONESI, U. **Food waste: causes, impacts and proposals.** Brilla Center for Food & Nutrition, Parma, Italy, 2012. Disponível em: <https://www.barillacfn.com/m/publications/food-waste-causes-impact-proposals.pdf>. Acesso em: 5 set. 2018.
- CAO, X.; GUO, D.; SOL, W.; ZHANG, P.; DING, G.; BIAN, J. **Tecnologia de separação supersônica para remoção de dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio do gás natural.** Journal of Cleaner Production, v. 288, p. 125689, 2021.
- COELHO, S. T. (coord.); GARCILASSO, V. P.; FERRAZ JÚNIOR, A. D. N.; SANTOS, M. M.; JOPPERT, C. L. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano.** São Paulo: IEE-USP, 2018.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. FERRAZ, J. M. G.; MARRIEL, I. E. **Biogás: fonte alternativa de energia**. Sete Lagoas: EMBRAPA/CNPMS, 1980. 27 p. (Circular Técnica, n. 3).

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Jaguariúna: Embrapa, 2006.

FAO. **Food wastage footprints: impacts on natural resources. Summary report**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/018/i3347e/i3347e.pdf>. Acesso em: 5 set. 2025.

FERREIRA, R. S. **Biodigestores e os fatores que determinam sua máxima produção**. Research, Society and Development, [S.l.], v. 9, n. 7, p. e544972677, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i7.2677. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/2677>. Acesso em: 5 nov. 2024.

FERRAZ, J. M. G.; MARRIEL, I. E. **Biogás: fonte alternativa de energia**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 1980. 27 p.

GUIDOLIN, Thays de Oliveira. **Carvão ativado de origem animal com nanopartículas de magnetita ancoradas para degradação fotocatalítica**. 2023.

GUSTAVSSON, J. **Global food losses and food waste: extent, causes and prevention**. Swedish Institute for Food and Biotechnology (SIK); Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 2011.

HOCEVAM, L. S.; D'AQUINO, C. A.; ALVES, C. T.; SANTOS, A. A. B. **O uso energético do biometano: potencial, desafios e oportunidades no Brasil**. Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 9, n. 6, p. 1–19, 2025.

MARTÍNEZ, N.; MENACHO, Z.; PACHÓN, F. **Food loss in a hungry world: a problem**. Agronomía Colombiana, v. 32, p. 283–293, 2014.

MENDES, D. B. **Perdas de alimentos nas centrais de abastecimento do Brasil: e a importância da hierarquia de recuperação dos alimentos**. 2019. 95 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Planejamento Ambiental) – Universidade Católica do Salvador, Salvador, 2019. Disponível em: <https://ri.ucsal.br/items/8e7ca451-c037-41e6-beac-a0b081732819>. Acesso em: 6 set. 2025.

OLIVEIRA, F. C. **Elaboração de um sistema de monitoramento composto por sensores e componentes eletrônicos por meio da plataforma Arduino para acompanhamento de características específicas do biogás**. 2023. 111 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2023.

OLIVEIRA, H.; ANTONELLO, R.; FIDÉLIS, A. J.; RINALDI, B. J. D. **Energia, sociedade e meio ambiente no desenvolvimento de um biodigestor: a interdisciplinaridade e a**

tecnologia Arduino para atividades investigativas. Química Nova na Escola, v. 40, n. 3, p. 144–152, 2018.

OLIVEIRA, S. V. W. B.; FERREIRA, A. H.; OLIVEIRA, M. M. B. **Aproveitamento de resíduos para geração de energia: ecoeficiência e sustentabilidade.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 5, n. 2, p. 156–177, dez. 2016.

PAIXÃO, V. V. M.; BATISTA, C. H.; CRUZ, M. C. P. **Construção de um biodigestor na escola: um estudo de caso fundamentado numa perspectiva Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS).** Química Nova na Escola, São Paulo, v. 41, n. 4, p. 351–359, nov. 2019.

PEROTTI, N.; CAETANO, M. O. **Dinâmica da concentração de poluentes em lagoas de estabilização tratando lixiviado de aterro sanitário.** Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica, v. 16, n. 3, p. 746–761, 2023. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.3.83003. Disponível em: <https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/83003>. Acesso em: 6 set. 2025.

PETERSSON, A.; WELLINGER, A. **Biogas upgrading technologies – developments and innovations.** IEA Bioenergy. Task 37. Energy from biogas and landfill gas, 2009. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2009/10/upgrading_rz_low_final.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

PINHEIRO, É. F. M. et al. **Tratamento aeróbio e anaeróbio da biomassa: do desperdício à obtenção de matérias-primas que reciclam nutrientes e energia.** In: SILVA, C. O. (org.). *Uso e manejo de solos de várzea para a produção de alimentos e energia.* Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022. v. 1, cap. 14, p. 183–196.

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Oito maneiras de superar a crise da poluição por resíduos.** 28 mar. 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/oito-maneiras-de-superar-crise-da-poluicao-por-residuos>. Acesso em: 6 set. 2025.

QUEIROZ, E. R. et al. **Caracterização da biomassa resultante de processo de biodigestão anaeróbia.** Revista Joinbr, Sobral, 2019. Disponível em: <https://www.joinbr.com.br>. Acesso em: 6 set. 2025.

ROHRBOUGH, W. G. et al. **Reagent chemicals: American Chemical Society specifications.** 7. ed. Washington, DC: American Chemical Society, 1986.

SCHÄFER, T. M. Z. **Síntese, caracterização e aplicação de nanopartículas de óxido de ferro (Fe₃O₄).** 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2017. Disponível em: https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/3266/2/Thaynara_Schafer_2017.pdf. Acesso em: 20 ago. 2025

SILVA, E. S.; OLIVEIRA, G. S. **Biodigestor: uma proposta de aproveitamento do lixo orgânico no município de Santarém.** Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2013. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_biodigestor.pdf . Acesso em: 6 set. 2025.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Biodigestores: energia e fertilizante a partir de dejetos animais.** São Paulo: CETESB, 2014. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/15.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2025.

WEREKO-BOBBY, C. Y.; HAGEN, E. B. **Biomass conversion and technology.** New York: John Wiley & Sons, 2000. p. 2–224.