



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE
BIOGÁS COM CONTROLE TÉRMICO VIA ARDUINO: FUNDAMENTOS
EXPERIMENTAIS E APLICAÇÃO DIDÁTICA INTERDISCIPLINAR**

JULIANA BARBOSA DE PAIVA

Foz do Iguaçu
2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS
COM CONTROLE TÉRMICO VIA ARDUINO: FUNDAMENTOS EXPERIMENTAIS E
APLICAÇÃO DIDÁTICA INTERDISCIPLINAR**

JULIANA BARBOSA DE PAIVA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador(a): Prof.(a) Dr.(a) Andréia Cristina Furtado

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - CENTRAL

P149d

Paiva, Juliana Barbosa de.

Desenvolvimento e avaliação de um sistema de produção de biogás com controle térmico via arduino: fundamentos experimentais e aplicação didática interdisciplinar / Juliana Barbosa de Paiva. - Foz do Iguaçu, 2025.

84 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade.


Orientador: Andréia Cristina Furtado.

1. Aprendizagem baseada em problemas. 2. Sustentabilidade e meio ambiente. 3. Educação ambiental. 4. Abordagem interdisciplinar do conhecimento na educação. 5. Biogás. I. Furtado, Andréia Cristina. II.


DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM CONTROLE TÉRMICO VIA ARDUINO: FUNDAMENTOS EXPERIMENTAIS E APLICAÇÃO DIDÁTICA INTERDISCIPLINAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ANDREIA CRISTINA FURTADO**
Data: 23/10/2025 14:15:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador(a): Prof(a) Dr(a) Andréia Cristina Frutado
UNILA

Documento assinado digitalmente
 **JIAM PIRES FRIGO**
Data: 28/10/2025 21:37:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jiam Pires Frigo
UNILA

Documento assinado digitalmente
 **ITAMAR PENA NIERADKA**
Data: 05/11/2025 08:55:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Itamar Pena Nieradka
IFPR

Quando tiver que escolher entre estar certo e ser gentil, escolha ser gentil.

R. J. Palacio

PAIVA, Juliana Barbosa de. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de produção de biogás com controle térmico via arduino: fundamentos experimentais e aplicação didática interdisciplinar. 2025. 84 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Sustentabilidade) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.

RESUMO

Este estudo, em escala de bancada, realizou um teste experimental para corroborar evidências já descritas na literatura sobre a influência da temperatura na produção de biogás, e os resultados foram utilizados como base para a elaboração de um material didático interdisciplinar para alunos do Ensino Médio. A pesquisa, de caráter aplicado, natureza técnica e exploratória, com abordagem mista, foi conduzida em laboratório utilizando dois biodigestores idênticos, diferenciados apenas pela condição térmica: um mantido em temperatura ambiente e outro aquecido por sistema controlado via Arduino. Ambos operaram em regime de batelada, alimentados com dejetos suíno frescos diluídos em inóculo, e tiveram sua produção de biogás medida indiretamente pelo deslocamento de líquido ao longo de 33 dias de monitoramento. O sistema desenvolvido registrou de forma contínua, tanto em nuvem quanto localmente, as temperaturas do ambiente e internas do biodigestor, garantindo a integridade e redundância dos dados mesmo em eventuais falhas de conexão. Os resultados indicaram que o controle térmico elevou a produção de biogás em comparação ao sistema sem aquecimento, reforçando a importância da variável temperatura para a eficiência do processo. Com base nos resultados experimentais, elaborou-se uma proposta didática interdisciplinar alinhada à Base Nacional Comum Curricular, à Educação Ambiental e ao Ensino por Investigação. A proposta, desenvolvida a partir dos resultados experimentais e sem aplicação prática ou envolvimento de docentes e estudantes, foi elaborada para integrar as áreas de Ciências da Natureza, Matemática e Tecnologia, servindo como referência para que futuros trabalhos possam explorar, de forma contextualizada, conceitos de química, física, biologia, matemática, sustentabilidade e uso de tecnologias digitais. Do ponto de vista social e educacional, o trabalho apresenta um modelo de baixo custo, replicável e tecnicamente acessível, que pode ser utilizado em instituições de ensino e em comunidades, contribuindo para a difusão de práticas sustentáveis e para a conscientização ambiental.

Palavras-chave: aprendizagem baseada em problemas; sustentabilidade e meio ambiente; educação ambiental; abordagem interdisciplinar do conhecimento na educação; biogás.

PAIVA, Juliana Barbosa de. Desarrollo y evaluación de un sistema de producción de biogás con control térmico con el uso del Arduino: fundamentos experimentales y aplicación didáctica interdisciplinaria. 2025. 84 y h. Disertación (Maestría en Energía y Sustentabilidad) – Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, Foz do Iguaçu.

RESUMEN

Este estudio, en escala de laboratorio, realizó una prueba experimental para corroborar evidencias ya descritas en la literatura sobre la influencia de la temperatura en la producción del biogás, y los resultados se utilizaron como base para la elaboración de un material didáctico interdisciplinario para estudiantes de la escuela secundaria. La investigación, de carácter aplicado, naturaleza técnica, exploratoria y con un enfoque mixto, se llevó a cabo en laboratorio utilizando dos biodigestores iguales, diferenciados solo por la condición térmica: uno mantenido a temperatura ambiente y el otro calentado por un sistema controlado por Arduino. Ambos operaron en régimen de lote, alimentados con estiércol porcino fresco diluido en inóculo. La producción de biogás se midió indirectamente por el desplazamiento de líquido, a lo largo de 33 días que fue la duración del monitoreo. El sistema desarrollado registró de forma continua, tanto en la nube como localmente en el disco rígido de la computadora, las temperaturas del ambiente y la interna del biodigestor, garantizando la integridad y calidad de los datos incluso en eventuales fallas de conexión. Los resultados indicaron que el control térmico elevó la producción de biogás en comparación con el sistema sin calentamiento, reforzando la importancia del control de temperatura para la eficiencia del proceso. Ya con los resultados experimentales, se elaboró una propuesta didáctica interdisciplinaria juntamente con la Base Nacional Común Curricular, la Educación Ambiental y la Enseñanza por Investigación. La propuesta fue desarrollada a partir de los resultados experimentales, sin aplicación práctica o participación de docentes y estudiantes. Este estudio fue elaborado para integrar las áreas de Ciencias Naturales, Matemáticas y Tecnología, sirviendo como referencia para que futuros trabajos puedan explorar, de forma contextualizada, conceptos de química, física, biología, matemáticas, sustentabilidad y el uso de tecnologías digitales. Desde el punto de vista social y educativo, el trabajo presenta un modelo de bajo costo, replicable y técnicamente accesible, que puede ser utilizado en instituciones educativas y en comunidades, contribuyendo a la difusión de prácticas sustentables y a la concientización ambiental.

Palabras clave: aprendizaje basado en problemas; sustentabilidad y medio ambiente; educación ambiental; enfoque interdisciplinario del conocimiento en la educación; biogás.

PAIVA, Juliana Barbosa de. Design and assessment of a biogas production system with Arduino-based thermal control: experimental foundations and interdisciplinary didactic application. 2025. 84 p. Dissertation (Master in Energy and Sustainability) – Federal University for Latin American Integration, Foz do Iguaçu.

ABSTRACT

This bench-scale study aimed to corroborate evidence from the literature regarding the influence of temperature on biogas production and to inform the development of interdisciplinary didactic material for high school students. Conducted as applied, technical, and exploratory research with a mixed-methods approach, two identical biodigesters were used, differing only in thermal condition: one at ambient temperature and the other heated via an Arduino-controlled system. Both operated in batch mode with fresh swine manure diluted in inoculum, and biogas production was measured indirectly through liquid displacement over 33 days. Temperature data were continuously recorded locally and in the cloud, ensuring data integrity and redundancy even during connection failures. Results showed that thermal control enhanced biogas production compared to the unheated system, confirming the critical role of temperature for process efficiency. Based on these findings, an interdisciplinary didactic proposal was developed in line with the National Common Curricular Base, Environmental Education, and Inquiry-Based Learning. Designed without practical implementation, the proposal integrates Natural Sciences, Mathematics, and Technology, offering a framework for contextualizing chemistry, physics, biology, mathematics, sustainability, and digital technology concepts. From a social and educational perspective, the study presents a low-cost, replicable, and technically accessible model suitable for educational institutions and communities, promoting sustainable practices and environmental awareness.

Keywords: problem-based learning; sustainability and the environment; environmental education; interdisciplinary approach to knowledge in education; biogas.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Termos de busca nos repositórios.....	33
Quadro 2 – Relação dos estudos.....	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeto do biodigestor com controle de temperatura. (1) Câmara de fermentação; (2) Selo hidráulico; (3) Gasômetro; (4) Válvula de saída de biogás; (5) Vedação do termistor.	36
Figura 2 – Projeto do biodigestor sem o controle térmico.	37
Figura 3 – Esquema do sistema de coleta de biogás.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Monitoramento da temperatura (°C) ambiente e interna do biodigestor.	56
Tabela 2 – Produção de biogás (mL) para cada biodigestor.	58
Tabela 3 – Produção de biogás (mL) acumulada.	60
Tabela 4 – Resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk.....	62
Tabela 5 – Resultados da análise de variância (ANOVA) para a produção de biogás.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Média diária das temperaturas.	58
Gráfico 2 – Produção de biogás por período experimental.	60
Gráfico 3 – Produção de biogás acumulada.	62

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Dispositivo para extração de ar residual.....	40
Fotografia 2 – Etapas da medição indireta do volume de biogás.....	41
Fotografia 3 – Materiais utilizados na montagem do protótipo.....	53
Fotografia 4 – Biodigestor em escala de bancada equipado com sistema de controle térmico automatizado.....	53
Fotografia 5 – Biodigestor em escala de bancada operando sem sistema de controle térmico.....	54
Fotografia 6 –Visão simultânea dos dois biodigestores obtida pelo aplicativo da câmera de monitoramento, acompanhada do computador utilizado para gerenciamento do sistema de monitoramento e controle térmico.....	54
Fotografia 7 – Arduino Uno R3 com <i>display</i> acoplado ao sistema de controle térmico do biodigestor, indicando 38 °C e a mensagem “aquecendo”.....	55
Fotografia 8 – Sistema com Arduino e <i>display</i> configurado para medição da temperatura ambiente.....	55

LISTA DE SIGLAS

Sigla	Significado
ABP	Aprendizagem ativa, baseada em projetos
AIE	Agência Internacional de Energia
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicações)
APCC	Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
COP28	<i>Conference of the Parties</i> (28ª Conferência das Partes sobre Mudança do Clima da ONU)
CSV	<i>Comma-Separated Values</i> (Valores Separados por Vírgula)
DA	Digestão anaeróbia
DIY	<i>Do It Yourself</i> (Faça você mesmo)
ETI	<i>Energy Transition Index</i> (Índice de Transição Energética)
GEE	Gases de efeito estufa
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i> (Conselho Global de Energia Eólica)
IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Tela de Cristal Líquido)
NDIR	<i>Non-Dispersive Infrared Detector</i> (Detector Infravermelho Não Dispersivo)
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> (Coeficiente de Temperatura Negativo)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PBL	<i>Problem Based Learning</i> (Aprendizagem Baseada em Problemas)
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PRONASOLAR	Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinila
RSL	Revisão sistemática da literatura
ST	Sólidos totais
STEM	<i>Science, Technology, Engineering and Mathematics</i> (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática)
SV	Sólidos voláteis
TRH	Tempo de retenção hidráulica
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise de Variância)
GLMM	Modelos Lineares Generalizados Mistos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
1.3 JUSTIFICATIVA	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 MATRIZ ENERGÉTICA, EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	23
2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS	24
2.2.1 Tipos de Energias Renováveis	25
2.3 BIODIGESTORES E A DIGESTÃO ANAERÓBIA	28
2.4 TECNOLOGIA ARDUINO	29
2.5 EDUCAÇÃO	30
2.6 INTERDISCIPLINARIDADE NO ENSINO MÉDIO COM ARDUINO E BIODIGESTORES	30
2.6.1 O Arduino como Ferramenta Interdisciplinar na Educação	30
2.6.2 Biodigestores como Recurso Pedagógico para a Interdisciplinaridade	31
2.6.3 A Sinergia entre Arduino e Biodigestores na Educação Interdisciplinar	31
3 METODOLOGIA	33
3.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO	33
3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	33
3.2.1 Termos de Busca e Bases de Dados	33
3.2.2 Critérios de Inclusão e Exclusão	34
3.2.3 Seleção dos Estudos	34
3.3 DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS	34
3.3.1 Biodigestor com Controle de Temperatura Automatizado	34
3.3.2 Biodigestor sem Controle de Temperatura	36
3.3.3 Construção dos Biodigestores	37
3.3.4 Digestão Anaeróbia	38
3.3.5 Armazenamento e Quantificação do Gás Produzido	39

3.4 DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS ELETRÔNICOS DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE TEMPERATURA	42
3.4.1 Sistema de Monitoramento e Controle Térmico do Biodigestor	42
3.4.2 Sistema de Monitoramento da Temperatura Ambiente	43
3.4.3 Integração e Registro de Dados em Nuvem via <i>Script</i> Python	43
3.5 PROPOSTA DIDÁTICA INTERDISCIPLINAR: BIODIGESTORES E ARDUINO NO ENSINO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA	44
3.6 PÚBLICO-ALVO E POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO	45
3.7 COLETA DE DADOS	45
3.8 ANÁLISE DOS DADOS	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	47
4.2 CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS BIODIGESTORES	52
4.2.1 Protótipos Desenvolvidos	52
4.2.2 Caracterização e Otimização da Mistura Substrato-Inóculo	55
4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	56
4.4 PROPOSTA DIDÁTICA INTERDISCIPLINAR	65
4.4.1 Estrutura da Proposta Didática	67
4.4.2 Detalhamento das Atividades Práticas	68
4.4.3 Metodologias Pedagógicas Recomendadas	68
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

O século XXI trouxe desafios ambientais de grande magnitude, pressionando a sociedade global a buscar soluções sustentáveis que equilibrem o desenvolvimento econômico e a preservação do meio ambiente. Entre os problemas mais urgentes a serem enfrentados, destacam-se as mudanças climáticas, a manipulação dos recursos naturais e o aumento da poluição. Em resposta a essas questões, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, surgem como um plano global para garantir a prosperidade das futuras gerações. Dentre os 17 objetivos, destacam-se o ODS 4, que propõe a garantia de uma educação de qualidade, o ODS 7, que incentiva o uso de energia limpa e renovável, o ODS 11, que promove cidades e comunidades sustentáveis, e o ODS 13, voltado para a ação climática. Cada um desses objetivos desempenha um papel fundamental na construção de uma sociedade mais consciente e preparada para lidar com os desafios ambientais (ONU, 2015).

A educação ambiental é amplamente reconhecida como uma das ferramentas mais eficazes para transformar a forma como as novas gerações interagem com o meio ambiente. Ao integrar a educação formal com práticas voltadas à sustentabilidade, é possível desenvolver nos jovens uma postura crítica em relação às suas ações e seus impactos no ecossistema global. Segundo Scherer (2019), a educação ambiental no espaço escolar não deve ser apenas teórica, mas precisa ser contextualizada e aplicada em situações práticas, incentivando os estudantes a pensarem em soluções para problemas locais e globais, e fortalecendo o papel da escola como promotora de cidadania e transformação social.

Nesse sentido, o conceito de economia circular, que busca minimizar o desperdício de recursos e promover o reaproveitamento de materiais em ciclos produtivos fechados, vem ganhando espaço nas discussões educacionais. Projetos que envolvem reciclagem, gestão de resíduos e geração de energia limpa — como o uso de biodigestores — oferecem oportunidades para que os alunos compreendam, na prática, como soluções sustentáveis podem ser aplicadas (Santos; Nadaleti, 2020; Cartaxo, 2020).

Os biodigestores são sistemas que realizam a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, transformando-os em biogás — que pode ser usado como fonte de energia renovável — e em fertilizante natural, que pode retornar ao solo como recurso agrícola (Shubeita, 2016). Seu funcionamento imita processos biológicos naturais e, quando aplicados em contextos escolares, proporcionam uma experiência educativa rica e interdisciplinar, envolvendo conteúdos de biologia, química, física e matemática, além de favorecer discussões sobre sustentabilidade e inovação

tecnológica (Cartaxo, 2020).

Neste estudo, foi adotado o modelo de biodigestor em batelada, por ser uma das formas mais simples e acessíveis de digestão anaeróbia. Sua escolha se justifica pela facilidade de montagem e manutenção, além de permitir que os alunos acompanhem o processo de decomposição da matéria orgânica de maneira didática. Esse sistema funciona com a inserção total do conteúdo de uma só vez, sem necessidade de alimentação contínua, o que simplifica o acompanhamento e torna sua aplicação mais viável no ambiente escolar (Gonçalves, 2018).

A automação de processos com o uso de tecnologias digitais, como a plataforma Arduino, amplia ainda mais as possibilidades didáticas desse tipo de experimento. O Arduino é uma ferramenta de prototipagem eletrônica de baixo custo, aberta e flexível, que permite o desenvolvimento de projetos interativos. Sua utilização no monitoramento de variáveis críticas, como a temperatura, favorece a compreensão de como a tecnologia pode ser aplicada para otimizar processos e tornar sistemas mais eficientes (Arduino, 2024).

Esse enfoque interdisciplinar, que une ciência ambiental, tecnologia e inovação, é fundamental para a formação de uma consciência crítica nas novas gerações. Estudos que integram o uso de tecnologias como o Arduino e o desenvolvimento de biodigestores escolares contribuem para uma aprendizagem ativa, baseada em projetos (ABP), em que os alunos participam de todas as etapas — da pesquisa à execução —, tornando-se protagonistas do processo de ensino-aprendizagem (Andrade et al., 2023).

Neste contexto, este estudo propõe o desenvolvimento e a análise de dois biodigestores — um com controle de temperatura automatizado por meio do Arduino e outro operando sem esse recurso — com o objetivo de avaliar a eficiência na produção de biogás sob diferentes condições térmicas. Além disso, busca-se explorar o potencial da proposta como ferramenta interdisciplinar, integrando conteúdos de química, biologia, física e matemática por meio da temática da digestão anaeróbia e da geração de energia renovável.

1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

O presente estudo está inserido no contexto da promoção de práticas interdisciplinares no Ensino Médio, por meio da integração de conteúdos em torno de um tema comum: a digestão anaeróbia e a produção de energia renovável. Para isso, propõe-se o desenvolvimento e a análise de dois biodigestores operando em batelada, sendo um com controle automatizado de temperatura e outro sem esse controle, com o objetivo de gerar dados reais e contextualizados que possibilitem a construção de atividades didáticas integradas. O foco principal

da pesquisa está na elaboração de propostas pedagógicas que estimulem a articulação entre diferentes áreas do conhecimento, utilizando o experimento como suporte para o desenvolvimento de competências científicas, ambientais e tecnológicas no ensino de ciências.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e apresentar uma proposta didática interdisciplinar para o Ensino Médio, utilizando a temática da digestão anaeróbia e da produção de energia renovável como recurso pedagógico para a contextualização de conceitos das áreas de Química, Biologia, Física e Matemática.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Projetar dois protótipos de biodigestores em escala reduzida, considerando diferentes condições de controle térmico.
- Construir os protótipos planejados, utilizando materiais acessíveis e adequados ao contexto educacional.
- Testar os protótipos desenvolvidos, gerando dados comparativos sobre a produção de biogás em relação ao efeito do controle da temperatura.
- Analisar os resultados experimentais obtidos, identificando potenciais relações entre temperatura e rendimento na produção de biogás.
- Elaborar atividades didáticas interdisciplinares baseadas nos resultados experimentais obtidos.
- Estruturar uma proposta pedagógica que favoreça a contextualização científica e tecnológica, integrando a temática da digestão anaeróbia e da produção de energia renovável com conteúdos curriculares.

1.3 JUSTIFICATIVA

A proposta deste estudo surgiu da necessidade de aproximar os conteúdos escolares de situações concretas e atuais, como a geração de energia renovável, a gestão de resíduos e o uso de tecnologias acessíveis. Muitas vezes, os temas ensinados nas disciplinas de química, biologia, física e matemática aparecem de forma isolada e sem conexão com o dia a dia dos

estudantes. Pensando nisso, este trabalho apresenta uma proposta que pode ser utilizada como recurso didático para promover a interdisciplinaridade no Ensino Médio.

O desenvolvimento de dois biodigestores — um com controle de temperatura feito por meio da plataforma Arduino e outro sem esse controle — tem o objetivo de gerar dados reais sobre a produção de biogás em diferentes condições térmicas. Embora o experimento não tenha sido aplicado diretamente com os alunos, ele foi pensado desde o início como uma ferramenta que pode ser usada em sala de aula para incentivar o aprendizado por investigação, despertar o interesse dos estudantes e tornar os conteúdos mais significativos.

A integração do Arduino ao projeto também reforça a importância da proposta, ao trazer a tecnologia para dentro do ambiente escolar de maneira prática e acessível. Além de possibilitar o controle e o monitoramento de variáveis importantes no experimento, como a temperatura, o uso dessa plataforma permite que os alunos desenvolvam habilidades em programação, raciocínio lógico e resolução de problemas.

Ao abordar temas como sustentabilidade, energia, reaproveitamento de resíduos e automação, esta proposta se encaixa perfeitamente em projetos pedagógicos que envolvem a educação ambiental, o ensino por projetos (ABP) e a construção do conhecimento de forma integrada. Ela também se alinha às orientações da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que valoriza a formação de cidadãos críticos, autônomos e preparados para lidar com os desafios da sociedade contemporânea.

Por isso, este estudo se justifica por apresentar uma alternativa prática e interdisciplinar que pode ser utilizada por professores como base para a criação de atividades contextualizadas, capazes de envolver os alunos em um processo de aprendizagem mais ativo, reflexivo e conectado com o mundo real.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA, EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A matriz energética global enfrenta o desafio de equilibrar segurança, equidade e sustentabilidade em um cenário marcado por incertezas geopolíticas e econômicas. De acordo com o *Energy Transition Index* (ETI) 2024, a transição energética tem avançado em nível global, mas de forma desigual. Embora os avanços em energia renovável e eficiência energética sejam significativos, a integração de fontes limpas na matriz energética varia entre os países. O Brasil, por exemplo, se destaca pela predominância de energia hidrelétrica, solar e eólica, o que garante uma posição de destaque na transição para uma matriz mais sustentável. No entanto, muitos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil, ainda enfrentam desafios para atrair os investimentos necessários para acelerar essa transformação, o que limita o ritmo dessa transição (OC, 2024; WEF, 2024).

No caso do Brasil, cerca de 49% da matriz energética é composta por fontes renováveis, enquanto, na matriz elétrica, esse percentual chega a 89,2%, colocando o país em uma posição favorável em relação a outras nações. Porém, o setor de energia ainda foi responsável por 17,8% das emissões nacionais de gases de efeito estufa (GEE) em 2023, o que ressalta a importância de ampliar o uso de fontes limpas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural (OC, 2024).

A transição energética global busca atingir metas ousadas, como triplicar a capacidade de energias renováveis e dobrar a eficiência energética até 2030, conforme definido na *Conference of the Parties* (COP28). Essas metas são essenciais para limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C e alcançar a neutralidade de carbono até 2050. Entretanto, a concretização dessas metas exige altos investimentos, que, em sua maior parte, continuam concentrados em economias avançadas, enquanto países em desenvolvimento permanecem em desvantagem (WEF, 2024).

Nesse contexto, a transição energética surge como uma oportunidade indispensável para enfrentar desafios como as mudanças climáticas e a dependência de combustíveis fósseis. Avançar nessa direção depende de políticas públicas eficazes, de investimentos bem direcionados e do desenvolvimento de soluções sustentáveis, garantindo um futuro energético mais justo e acessível para todos.

2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

As energias renováveis são obtidas a partir de recursos naturais que se regeneram constantemente e estão disponíveis em abundância, oferecendo uma alternativa limpa e sustentável em relação às fontes de energia tradicionais, como os combustíveis fósseis (Goldemberg; Lucon, 2007; Ramalho; Oliveira; Miranda, 2022).

Diferentemente das fontes não renováveis, como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural, que são finitas e responsáveis pela emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa (GEE), as energias renováveis desempenham um papel central no enfrentamento das mudanças climáticas, na preservação dos recursos naturais e no desenvolvimento sustentável. As principais fontes renováveis incluem a energia solar, eólica, hidráulica e a proveniente da biomassa, todas elas fundamentais para a construção de uma matriz energética menos poluente (Goldemberg; Lucon, 2007).

Nesse contexto, a adoção de práticas baseadas nos princípios da economia circular torna-se essencial. Diferentemente do modelo linear tradicional de “extrair, produzir e descartar”, a economia circular promove o reaproveitamento de resíduos e a regeneração de recursos, contribuindo para uma gestão mais eficiente e sustentável (Santos; Nadaleti, 2020). A utilização de biodigestores, por exemplo, possibilita a transformação de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizantes, representando uma aplicação concreta desses princípios. Quando aliados a tecnologias digitais, como o uso do Arduino para controle automatizado de variáveis, esses sistemas podem ter sua eficiência otimizada, além de oferecerem maior potencial pedagógico e investigativo em contextos educacionais.

A transição para uma economia de baixo carbono baseada em fontes renováveis é um desafio global de grande magnitude. As observações da Agência Internacional de Energia (AIE) indicam que, até 2050, as energias renováveis poderão responder por cerca de 80% da geração global de eletricidade, impulsionadas por políticas ambientais mais rigorosas e avanços tecnológicos que estão tornando essas fontes mais acessíveis e eficientes (IEA, 2023; MME, 2024).

Nesse cenário de transição energética, práticas alinhadas à economia circular ganham relevância por contribuírem com a redução das emissões de gases de efeito estufa e com o uso mais racional dos recursos naturais. Essas ações estão em consonância com compromissos globais, como o Acordo de Paris, e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que orientam políticas e projetos voltados à sustentabilidade. Destacam-se, especialmente, o ODS 7, que busca garantir o acesso universal à energia limpa e acessível, e o ODS 12, que incentiva padrões sustentáveis de consumo e produção — ambos fundamentais para promover soluções que integrem inovação tecnológica e reaproveitamento de resíduos, como as abordadas neste estudo (ONU, 2015).

2.2.1 Tipos de Energias Renováveis

- Energia Solar

A energia solar é uma das formas mais promissoras e amplamente difundidas de energia renovável, sendo captada principalmente por meio de painéis fotovoltaicos e concentradores solares, que convertem a luz do sol em eletricidade. Sua abundância tem atraído grande interesse na escala global, especialmente em regiões de alta incidência solar, como o Brasil (Rebollar; Rodrigues, 2011). Além de ser uma fonte de energia limpa, a energia solar vem se tornando cada vez mais acessível, impulsionada pela redução significativa nos custos de produção dos painéis e pelo avanço de novas tecnologias de armazenamento de energia.

O apoio governamental tem desempenhado um papel fundamental nessa expansão. No Brasil, a Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica (PRONASOLAR) incentiva o acesso à energia solar para famílias de baixa renda, oferecendo linhas de crédito facilitadas, além de condições de pagamento e juros (Brasil, 2018).

Nos últimos anos, a energia solar tem se destacado como a fonte renovável de crescimento mais rápido no cenário global. Em 2022, gerou aproximadamente 1.294 TWh de eletricidade, um aumento de 25,6% em relação ao ano anterior. Esse avanço reflete tanto a queda nos custos de instalação dos painéis solares quanto o aumento da eficiência tecnológica. Em 2023, a capacidade instalada global de energia solar atingiu 1.418 GW, consolidando-se como a maior fonte de capacidade renovável instalada no mundo. Esse crescimento acelerado permitiu que a energia solar se tornasse uma parte significativa da matriz elétrica em regiões como a América do Norte, a Europa e a Ásia (IRENA, 2024).

- Energia Eólica

A energia eólica é gerada a partir da força dos ventos, convertida em eletricidade por meio de aerogeradores. As regiões costeiras e áreas de barreira são particularmente propícias para a instalação de parques eólicos, pois possuem ventos constantes e fortes, o que aumenta a eficiência dos geradores. Além disso, a energia eólica apresenta o benefício de ser modular, permitindo a criação de projetos de pequena e grande escala (Castro, 2009).

De acordo com o Relatório Global Eólico 2024 do *Global Wind Energy Council* (GWEC), o crescimento da energia eólica tem se acelerado em todo o mundo, com um total de 117 GW de novas instalações em 2023, representando um impressionante aumento de 50% em comparação com 2022. Este crescimento contínuo foi evidenciado pelo fato de que 54 países, de todos os continentes, construíram novas usinas de energia eólica em 2023. Em resposta a esse impulso, o GWEC reviu a sua previsão de crescimento para o período de 2024 a 2030, aumentando-a em 10%, agora estimando um total de 1.210 GW. Esta revisão é reflexo da implementação de políticas industriais em países com economias de grande relevância no setor energético, como

Estados Unidos, China e membros da União Europeia, além de um fortalecimento da energia eólica *offshore* — geração de eletricidade por turbinas instaladas no mar —, que promove um crescimento significativo em mercados emergentes e economias em desenvolvimento (GWEC, 2024).

- Energia Hidráulica

A energia hidráulica, ou hidrelétrica, é gerada a partir da força das águas em movimento, utilizando a energia potencial gravitacional de grandes volumes de água acumulada em reservatórios. Esse processo ocorre, geralmente, por meio da construção de barragens que criam desníveis no curso dos rios, direcionando o fluxo de água para turbinas hidráulicas, convertendo a energia cinética em eletricidade. Apesar de sua grande contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a construção de grandes barragens pode causar impactos ambientais e sociais, como a inundação de extensas áreas e o deslocamento de comunidades locais (Queiroz et al., 2013).

No entanto, novas tecnologias foram desenvolvidas para reduzir esses efeitos, como as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), que utilizam estruturas de menor porte e têm menor impacto ambiental. Outra solução é representada pelas hidrelétricas reversíveis, também conhecidas como usinas de bombeamento. Essas usinas funcionam como “baterias” gigantes: durante períodos de baixa demanda por energia, a água é bombeada de um reservatório inferior para um superior, utilizando o excedente de eletricidade disponível. Quando a demanda aumenta, essa água armazenada é liberada novamente, gerando eletricidade ao passar pelas turbinas. Essa tecnologia auxilia no armazenamento de energia e na estabilização do sistema elétrico, especialmente em combinação com fontes intermitentes, como solar e eólica (CBIE, 2020; Engenharia 360, 2023).

A energia hidráulica permanece como a principal fonte de geração de energia renovável no mundo. Em 2022, a geração global de energia a partir de hidrelétricas foi de aproximadamente 4.330 TWh, representando um modesto aumento de 0,8% em relação ao ano anterior. Embora o crescimento seja lento, a energia hidráulica ainda responde por cerca de 46,3% da geração renovável global, devido à sua capacidade de fornecer eletricidade de forma constante e previsível, especialmente em regiões onde há grandes reservatórios naturais. A América do Sul lidera a produção de energia renovável, com cerca de 75% de sua geração proveniente de fontes renováveis, predominantemente a energia hidrelétrica. Esse destaque regional faz da América do Sul uma das maiores usuárias dessa fonte no mundo, com o Brasil figurando entre os principais produtores globais de energia hidráulica (IRENA, 2024).

- Energia Geotérmica

A energia geotérmica é gerada a partir do calor proveniente do interior da Terra e é captada principalmente em regiões vulcânicas ou áreas com significativa atividade tectônica.

Embora ainda seja uma fonte relativamente pouco explorada, a geotermia possui grande potencial, especialmente em locais onde o calor da rocha está próximo à superfície. Países como Islândia, Filipinas e Estados Unidos destacam o uso dessa fonte de energia, empregando-a tanto para geração elétrica quanto para aquecimento direto de edifícios (Onody, 2022).

Em 2022, a energia geotérmica gerou cerca de 97 TWh no mundo (IRENA, 2024). Apesar de representar uma menor participação na composição global de energias renováveis, essa fonte possui características que se tornam competitivas em regiões com alta atividade geotérmica. Assim como a energia hidráulica e a bioenergia (energia obtida a partir da biomassa), a geotermia oferece uma geração contínua e previsível de eletricidade, pois não depende das condições climáticas. Em áreas da Europa, América do Norte e Ásia onde o potencial geotérmico é elevado, a geotermia se apresenta como uma opção estratégica para expandir o uso de renováveis, contribuindo para uma matriz energética mais diversificada e resiliente, com baixa variabilidade sazonal (Arboit, 2013; Onody, 2022).

- Bioenergia

A bioenergia, obtida a partir de biomassa composta por materiais orgânicos de origem vegetal, animal ou resíduos, é uma fonte renovável e versátil que contribui para a diversificação da matriz energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa (Sebrae, 2022). Seu aproveitamento pode ocorrer por meio de diferentes tecnologias que convertem biomassa em energia. A queima direta de resíduos agrícolas e florestais é amplamente utilizada para gerar calor e eletricidade. A gaseificação transforma biomassa sólida em gás combustível, aproveitado em turbinas para produção de energia. A pirólise, realizada em ausência de oxigênio, produz biocarvão, bio-óleo e gases combustíveis. Já os biocombustíveis líquidos, como etanol e biodiesel, são derivados de matérias-primas como cana-de-açúcar, milho, óleos vegetais e gorduras animais. Por fim, a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos resulta na geração de biogás, composto principalmente por metano e dióxido de carbono, e biofertilizantes (Marafon, 2016).

O biogás, resultante do processo anaeróbico de degradação de resíduos orgânicos em biodigestores, representa uma alternativa energética renovável e sustentável, especialmente em contextos rurais. Sua produção contribui para a redução da dependência de fontes fósseis e possibilita o aproveitamento de resíduos que, de outra forma, seriam descartados. Além disso, o biogás pode ser utilizado tanto na geração de eletricidade quanto no aquecimento, promovendo autonomia energética e valorizando práticas alinhadas aos princípios da sustentabilidade (Vieira; Polli, 2020).

A bioenergia, composta por biomassa e biogás, continua a desempenhar um papel essencial no cenário global das energias renováveis. Segundo o relatório *Renewable Energy Highlights 2024*, da Agência Internacional de Energia Renovável, a bioenergia gerou

aproximadamente 619 TWh em 2022, o que representa um aumento de 1,5% em relação ao ano de 2021. Embora o crescimento tenha sido relativamente modesto comparado a outras fontes renováveis, como a energia solar e eólica, a bioenergia ainda se destaca como uma fonte estável e crucial para muitas regiões do mundo. Esse papel é particularmente importante para países com abundância de resíduos agrícolas e florestais, que podem ser transformados tanto em eletricidade quanto em energia térmica de forma sustentável (IRENA, 2024).

2.3 BIODIGESTORES E A DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um dos processos mais eficientes para a conversão de resíduos orgânicos em energia. Esse processo ocorre em biodigestores, onde microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás e de um subproduto rico em nutrientes, conhecido como digestato, que pode ser utilizado como biofertilizante, agregando valor ambiental ao sistema (Karlsson, 2014).

O biogás gerado a partir da biomassa possui uma ampla gama de aplicações, incluindo a geração de eletricidade, aquecimento, combustível veicular e no preparo de alimentos. Ele é composto, principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), mas também contém outros gases, como nitrogênio (N_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e vapor d'água, cujas concentrações variam conforme a origem da biomassa e as condições de digestão (Shubeita, 2016).

A produção de biogás ocorre em quatro etapas principais da digestão anaeróbia (DA). Na hidrólise, moléculas complexas, como proteínas, lipídios e carboidratos, são quebradas em compostos menores, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. Em seguida, na acidogênese, esses compostos são degradados, formando ácidos graxos voláteis (como ácido acético, ácido propiônico, ácido butírico e ácido valérico), além de gerar amônia (NH_3), dióxido de carbono (CO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S). Na acetogênese, esses produtos são convertidos em gás carbônico (CO_2), hidrogênio (H_2) e ácido acético (CH_3COOH), essenciais para a última fase, a metanogênese, onde arqueas metanogênicas transformam ácido acético e hidrogênio em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O equilíbrio entre essas etapas e o controle de fatores como temperatura e pH no biodigestor são fundamentais para garantir a eficiência da produção de biogás (Karlsson, 2014; Shubeita, 2016).

Os biodigestores, dispositivos específicos para a digestão anaeróbia de resíduos, são essenciais nesse processo. Eles não apenas permitem a produção controlada de biogás, mas também desempenham um papel crucial na redução das emissões de gases de efeito estufa. Em particular, o metano, que seria liberado na reserva natural dos resíduos em aterros, é capturado e aproveitado como fonte de energia renovável, evitando sua liberação na atmosfera e contribuindo para o combate às mudanças climáticas (Mello, 2023).

Existem diferentes tipos de biodigestores, adequados a distintos contextos de aplicação. Entre os mais comuns, destacam-se os sistemas em batelada e os sistemas contínuos. De acordo com Gonçalves (2018), o sistema de batelada opera com a inserção única de resíduos, sendo o processo de decomposição realizado de forma controlada e fechada. Já o sistema contínuo permite o processamento ininterrupto dos resíduos, sendo amplamente utilizado em contextos industriais ou agrícolas, devido à sua maior eficiência na produção de biogás em larga escala.

No ambiente educacional, os biodigestores modelo batelada apresentam um valor pedagógico significativo, pois possibilitam o acompanhamento de todas as fases da digestão anaeróbia, o que favorece a compreensão didática do processo. Essa característica torna-os ferramentas eficazes para o ensino interdisciplinar, integrando conteúdos de biologia, química, matemática e física, além de promover reflexões sobre sustentabilidade, gestão de resíduos e uso de fontes renováveis de energia. Projetos educativos com biodigestores estimulam tanto o aprendizado teórico quanto o desenvolvimento de habilidades práticas, conectando ciência, tecnologia e cotidiano (Scarpari, 2009; Lima, 2021; Matsuda, 2024).

O uso de biodigestores está diretamente alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os relacionados à energia limpa e acessível (ODS 7) e à ação climática (ODS 13) (Mello, 2023). Ao promover a transformação de resíduos orgânicos em energia e fertilizantes, essas tecnologias reforçam o conceito de economia circular, reduzindo a dependência de aterros sanitários, minimizando a emissão de gases de efeito estufa e contribuindo para a transição energética sustentável (Santos; Nadaleti, 2020).

2.4 TECNOLOGIA ARDUINO

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica que revolucionou o campo da automação e da eletrônica. Criado em 2005, ele é composto por uma placa de hardware programável e um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), permitindo a criação de projetos interativos com sensores e atuadores de maneira acessível (Evans; Noble; Hochenbaum, 2013). Sua facilidade de uso e versatilidade rapidamente o tornaram uma ferramenta popular para a criação de protótipos, aplicada em áreas como robótica e automação residencial e industrial.

O que diferencia o Arduino de outras plataformas é seu caráter *open-source*, tanto no *hardware* quanto no *software*. Isso significa que seus esquemas eletrônicos e códigos são disponibilizados publicamente, permitindo que qualquer pessoa possa estudá-los, modificá-los e redistribuí-los livremente. Essa abordagem facilita o acesso a materiais didáticos, bibliotecas de código e suporte de uma vasta comunidade global de desenvolvedores. O Arduino não apenas simplifica a automação e a programação, como também promove a cultura do 'faça você mesmo', do inglês *do it yourself* (DIY), estimulando a criatividade e a inovação em diversas áreas, incluindo na

educação (Arduino, 2024).

2.5 EDUCAÇÃO

A educação desempenha um papel central no desenvolvimento humano e social, sendo um pilar fundamental para a formação de indivíduos críticos, autônomos e capazes de atuar de forma significativa na sociedade (Freire, 1996; Gadotti, 2003). Mais do que a mera transmissão de conhecimentos, a educação moderna busca promover o desenvolvimento integral dos estudantes, estimulando a curiosidade, a criatividade e a capacidade de resolver problemas complexos (Instituto Algar, 2025).

Nesse contexto, as metodologias de ensino e as abordagens pedagógicas evoluem constantemente para atender às demandas de um mundo em rápida transformação. A valorização de práticas que conectam o aprendizado formal com a realidade dos alunos, que incentivam a participação ativa e que promovem a reflexão crítica sobre os desafios contemporâneos, torna-se essencial. A educação, em sua essência, é um processo contínuo de construção de saberes e de formação de cidadãos conscientes de seu papel e de suas responsabilidades no mundo (Saviani, 2000). A escola, como espaço privilegiado de aprendizagem, tem o papel de proporcionar experiências que preparem os estudantes para os desafios do século XXI, desenvolvendo não apenas competências cognitivas, mas também socioemocionais e éticas (Silva, 2017).

2.6 INTERDISCIPLINARIDADE NO ENSINO MÉDIO COM ARDUINO E BIODIGESTORES

2.6.1 O Arduino como Ferramenta Interdisciplinar na Educação

A robótica educacional tem se consolidado como uma ferramenta poderosa para promover a interdisciplinaridade no ensino médio. Como demonstrado anteriormente, a plataforma Arduino oferece um ambiente ideal para a aprendizagem interdisciplinar. A natureza de *hardware* livre e a sua facilidade de programação permitem que estudantes e professores explorem conceitos de diversas áreas do conhecimento de forma prática e engajadora. A construção de projetos com Arduino exige a aplicação de princípios de física (eletrônica, eletricidade, mecânica), matemática (lógica de programação, algoritmos, análise de dados), e até mesmo biologia e química (sensores para monitoramento de variáveis ambientais em experimentos). Essa abordagem *hands-on* estimula o pensamento computacional, a criatividade, a resolução de problemas e o trabalho em equipe, habilidades essenciais para o século XXI (Dias; Franco, 2017; Silva Junior, 2024; Santos, 2025).

Estudos como o de Dias e Franco (2017) demonstram a eficácia do Arduino em integrar disciplinas como Física, Lógica e Matemática, promovendo um aprendizado mais ativo e significativo. A utilização de sensores e atuadores em projetos com Arduino permite a conexão com

fenômenos do mundo real, tornando o aprendizado mais contextualizado. Por exemplo, a criação de um sistema de monitoramento de temperatura, como o utilizado neste estudo, integra conceitos de eletrônica, programação e termodinâmica, proporcionando uma compreensão mais profunda das interações entre sistemas físicos e biológicos.

2.6.2 Biodigestores como Recurso Pedagógico para a Interdisciplinaridade

Os biodigestores, por sua vez, representam um excelente recurso pedagógico para abordar temas de sustentabilidade, energias renováveis e gestão de resíduos de maneira interdisciplinar no ensino médio. A construção e o monitoramento de um biodigestor envolvem uma gama de conhecimentos que transcendem as fronteiras disciplinares tradicionais. Biologia (microbiologia, ecologia, ciclos biogeoquímicos), Química (reações de digestão anaeróbia, composição do biogás), Física (pressão, volume, fluxo de gases) e Educação Ambiental (impacto ambiental, economia circular, energias limpas) são algumas das áreas intrinsecamente conectadas ao estudo dos biodigestores (Kretzer Et Al., 2015; Biogaseenergia, 2024; Matsuda, 2024).

Projetos que envolvem a construção de biodigestores em ambiente escolar, como os descritos por Kretzer et al. (2015) e Matsuda et al. (2024), não apenas promovem a conscientização ambiental, mas também oferecem uma oportunidade única para os alunos aplicarem conhecimentos teóricos em um contexto prático. A observação da transformação de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizantes permite uma compreensão concreta dos princípios da economia circular e da importância da gestão sustentável de recursos. Além disso, a análise da produção de biogás e das condições operacionais do biodigestor estimula o desenvolvimento de habilidades de pesquisa, análise crítica e interpretação de dados.

2.6.3 A Sinergia entre Arduino e Biodigestores na Educação Interdisciplinar

A integração do Arduino com biodigestores potencializa o caráter interdisciplinar desses projetos, criando um ambiente de aprendizagem ainda mais rico e complexo. O Arduino pode ser empregado para monitorar e controlar variáveis cruciais do biodigestor, como temperatura, pH e produção de gás, transformando o biodigestor em um laboratório vivo para o estudo de sistemas biológicos e tecnológicos. Essa sinergia permite que os alunos apliquem conhecimentos de eletrônica e programação para otimizar um processo biológico, reforçando a conexão intrínseca entre ciência, tecnologia e sustentabilidade (Oliveira, 2018).

Ao automatizar o monitoramento da temperatura em um biodigestor, por exemplo, os alunos podem observar em tempo real como as variações térmicas influenciam a atividade microbiana e a produção de biogás. Essa experiência contribui para a compreensão integrada de conceitos de termodinâmica, biologia e sustentabilidade, ao mesmo tempo em que introduz noções

práticas de automação e controle de processos, amplamente utilizados em contextos industriais e ambientais. A coleta e análise dos dados por meio da plataforma Arduino também favorecem o desenvolvimento de competências em matemática e estatística, especialmente na interpretação de fenômenos dinâmicos e complexos. A utilização desse tipo de tecnologia em ambientes educativos amplia as possibilidades de ensino interdisciplinar e aproxima os estudantes de temas atuais relacionados à ciência, tecnologia e transição energética.

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO

Este estudo, de caráter aplicado, natureza técnica e exploratória, com abordagem mista (quantitativa e qualitativa), teve como objetivo avaliar a influência do controle de temperatura na produção de biogás em dois biodigestores de bancada idênticos, diferenciados apenas pela condição térmica: um mantido em temperatura ambiente e outro aquecido por sistema controlado via Arduino. O experimento, desenvolvido em laboratório, gerou dados que fundamentaram a elaboração de uma proposta didática interdisciplinar para o Ensino Médio, alinhada à Base Nacional Comum Curricular, à Educação Ambiental e ao Ensino por Investigação. Trata-se de uma pesquisa que se concentrou na concepção da proposta como ferramenta integradora das disciplinas, sem realização de atividades ou apresentação junto a estudantes ou professores. A proposta foi adaptada ao conteúdo das áreas de Ciências da Natureza, Matemática e Tecnologia, buscando oferecer subsídios contextualizados para o trabalho docente e evidenciar o potencial da experimentação e da integração entre ciência, tecnologia e sustentabilidade no ambiente escolar.

3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão sistemática da literatura (RSL) foi realizada com o objetivo de investigar o estado da arte sobre a integração de biodigestores e tecnologia Arduino no contexto da educação ambiental. A revisão sistemática foi conduzida seguindo o protocolo de Monteiro et al. (2022), adaptado para a especificidade deste estudo.

3.2.1 Termos de Busca e Bases de Dados

Para a seleção dos artigos, foram utilizadas as bases de dados Google Acadêmico e Portal de Periódicos CAPES, com termos de busca elaborados a partir das palavras-chave: "Biodigestor", "Arduino", "Educação Ambiental" e "Escola". As buscas foram realizadas considerando o período de 2013 a 2023, sem restrições de idioma. O Quadro 1 apresenta os termos de busca que foram aplicados:

Quadro 1: Termos de busca nos repositórios.

BASE	MODELAGEM DE BUSCA
Portal Periódicos CAPES	<p>“Qualquer campo → contém → Biodigestor E Qualquer campo → contém → Arduino”</p> <p>Idioma: qualquer idioma</p> <p>Período: 2013-2023</p>
	<p>“Qualquer campo → contém → Biodigestor E Qualquer campo → contém →</p>

	Educação Ambiental” Idioma: qualquer idioma Período: 2013-2023
Google Acadêmico	"Biodigestor" + "Arduino" + "Escola” Idioma: qualquer idioma Período: 2013-2023

Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.2 Critérios de Inclusão e Exclusão

Foram estabelecidos critérios claros de inclusão e exclusão para garantir a relevância dos estudos selecionados. Os critérios de inclusão consideraram:

- Estudos publicados entre 2013 e 2023;
- Pesquisas que abordam a automação de biodigestores utilizando Arduino;
- Trabalhos que discutem a integração da tecnologia na educação ambiental em escolas.

Foram excluídos artigos duplicados, redundantes, ou que focassem em outras áreas científicas não relacionadas diretamente aos tópicos de interesse.

3.2.3 Seleção dos Estudos

Inicialmente, 72 artigos foram identificados por meio dos termos de pesquisa. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, 14 foram selecionados para análise completa, fornecendo uma base teórica necessária para o desenvolvimento deste estudo.

3.3 DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS

3.3.1 Biodigestor com Controle de Temperatura Automatizado

O projeto consistiu na construção de dois biodigestores de bancada, com o objetivo de comparar a produção de biogás em diferentes condições térmicas. Um dos biodigestores foi equipado com um sistema eletrônico de monitoramento e controle de temperatura, utilizando um Arduino Uno R3, Termistor NTC 5mm de 10K e Módulo Relé 1 Canal 5V. Quando a temperatura interna do biodigestor atingia 37 °C, uma lâmpada de secagem infravermelho de 250 W (soquete E27) era acionada automaticamente, desligando-se ao atingir 40 °C. Esse controle buscava manter o ambiente interno dentro da faixa mesofílica ideal para digestão anaeróbia.

Segundo Singh e Anand (1994), a produção de biogás ocorre de forma mais eficiente em duas faixas de temperatura: mesofílica (20–40 °C) e termofílica (50–60 °C). Entretanto, a operação em regime termofílico demanda maior controle, maior consumo energético e apresenta maior sensibilidade a variações ambientais. Por isso, optou-se por manter a temperatura dentro da

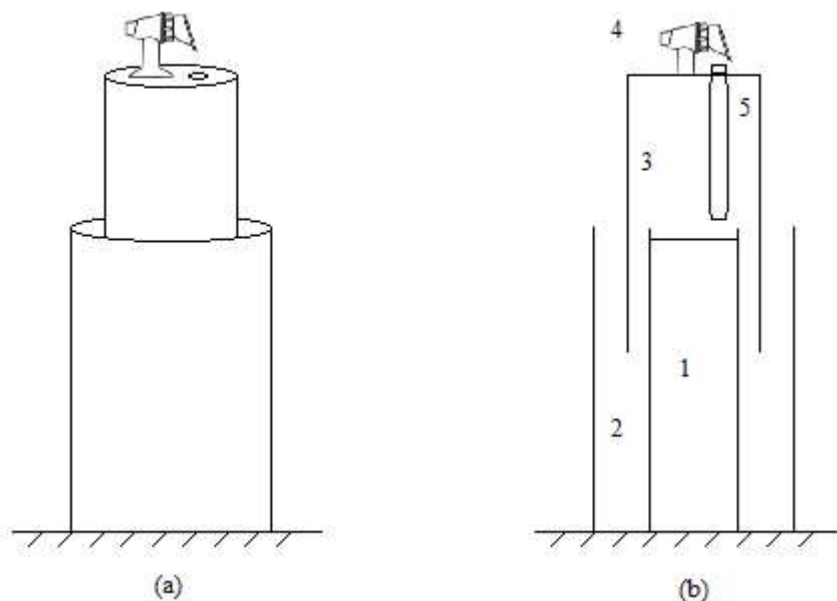
faixa mesofílica, com limite superior de 40 °C, a fim de evitar oscilações bruscas e garantir a estabilidade microbiológica do processo.

Além do sistema de aquecimento, esse biodigestor contava com um sistema de registro automatizado de dados. Esse sistema realizava leituras horárias por meio do termistor, armazenando cópias locais em um servidor conectado para garantir a preservação das informações. Os dados eram transmitidos automaticamente para uma planilha online no Google *Sheets* em quatro horários predefinidos ao longo do dia — 4h, 10h, 16h e 22h — permitindo o acesso remoto e o acompanhamento em tempo quase real. A adoção do *backup* local assegurava a integridade dos registros mesmo em situações de queda de internet, enquanto a programação dos envios otimizava o uso dos recursos de rede. Complementarmente, foi instalada uma câmera de segurança 360 *Kerui Tuya smart life* com acesso remoto, permitindo a verificação visual do funcionamento dos equipamentos e a identificação de eventuais problemas, como falhas de energia, interrupção de internet ou defeitos no computador. Essa estratégia possibilitava intervenções rápidas no local de instalação, situado no Instituto Federal do Paraná – Campus Foz do Iguaçu, minimizando riscos de perda de dados e interrupções no experimento.

Para ampliar a confiabilidade das medições e permitir uma melhor comparação entre condições controladas e naturais, foi desenvolvido um segundo sistema eletrônico dedicado ao monitoramento da temperatura ambiente no mesmo local. Assim como o sistema anterior, ele utilizava um termistor para realizar leituras horárias, armazenando os dados localmente em um servidor e enviando-os para uma planilha do Google *Sheets* nos mesmos quatro horários programados — 4h, 10h, 16h e 22h. Essa padronização nos intervalos de leitura e envio facilitou a análise paralela das temperaturas interna e externa, eliminando a dependência de estimativas provenientes de sites meteorológicos e assegurando dados reais obtidos diretamente no ambiente experimental.

O projeto do biodigestor com controle de temperatura e seus principais componentes está representado na Figura 1.

Figura 1—Projeto do biodigestor com controle de temperatura. (1) Câmara de fermentação; (2) Selo hidráulico; (3) Gasômetro; (4) Válvula de saída de biogás; (5) Vedação do termistor.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.3.2 Biodigestor sem Controle de Temperatura

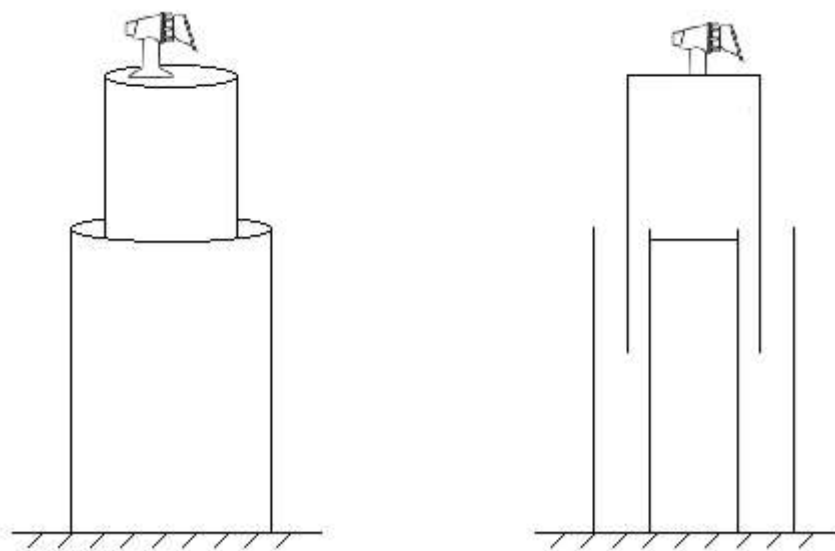
O outro biodigestor, por sua vez, foi mantido em temperatura ambiente, servindo como parâmetro de comparação com o modelo com o controle térmico. Essa abordagem experimental permite avaliar o impacto da temperatura controlada sobre a produção de biogás e a eficiência geral do processo. Cabe ainda destacar que o experimento foi conduzido entre 11 de junho e 14 de julho de 2025, período correspondente ao inverno em Foz do Iguaçu. Durante essa fase, a temperatura média do ambiente no interior do laboratório foi de aproximadamente 13,3 °C, enquanto a temperatura média do biodigestor controlado atingiu cerca de 38,6 °C. Essa diferença reflete o contraste entre o sistema com e sem controle térmico e permitiu avaliar o desempenho do processo em condições de menor temperatura ambiente.

Eventuais aplicações do sistema em épocas mais quentes — como no verão local, em que as temperaturas podem ultrapassar os 40 °C — exigiriam ajustes no algoritmo de controle. Para esses casos, é possível adaptar o sistema para incluir dispositivos de resfriamento automático, como ventiladores (*coolers*), garantindo que a temperatura do biodigestor permaneça dentro da faixa mesofílica. Essa flexibilidade demonstra o potencial de escalabilidade e adaptação do sistema desenvolvido para diferentes condições climáticas.

Na Figura 2 é apresentado o modelo do biodigestor sem controle térmico que, como mencionado anteriormente, foi construído com as mesmas dimensões e configuração do modelo com controle, mantendo iguais os volumes de projeto para biomassa, água e espaço destinado ao acúmulo de gás. A montagem dos dois biodigestores demandou quatro dias,

considerando o tempo necessário para as adaptações estruturais e a secagem completa da cola de poliuretano (PU). A única diferença entre eles foi a ausência do vidro acoplado ao *cap* do tubo intermediário, utilizado para proteger o termistor da umidade, já que esse sistema não possuía aquecimento.

Figura 2—Projeto do biodigestor sem o controle térmico.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.3.3 Construção dos Biodigestores

A construção dos biodigestores seguiu o modelo descrito por Soethe (2014) e Nieradka (2023), utilizando três tubos cilíndricos de PVC com diâmetros de 100 mm, 150 mm e 200 mm, e alturas respectivas de 38 cm, 28 cm e 42 cm. O tubo de menor diâmetro (100 mm) foi fixado ao *cap* do tubo de maior diâmetro (200 mm) funcionando como câmara de fermentação, enquanto o tubo intermediário (150 mm) recebeu uma torneira reta de PVC com alavanca, do tipo utilizada em filtros domésticos, instalada em seu *cap*. Para o biodigestor com controle de temperatura, um vidro para acomodar o sensor de temperatura foi instalado no tubo intermediário, conforme esquema da Figura 1.

O tubo intermediário (150 mm) serviu como gasômetro, com a extremidade superior vedada e invertida sobre o tubo de 100 mm. Já o tubo externo (200 mm) foi parcialmente preenchido com cerca de 15 cm de água, resultando em um volume útil aproximado de 3,53 L, formando um selo hidráulico que impedia a liberação do gás e assegurava as condições anaeróbias do sistema. Para garantir a vedação, utilizou-se cola PU nas adaptações e nos *caps*.

Para prevenir a proliferação de mosquitos na água do selo hidráulico, especialmente *Aedes aegypti*, foi adicionada aproximadamente 110 mL de água sanitária ao volume de água, o que corresponde a uma concentração inicial estimada de 3,7% (v/v).

Devido à evaporação provocada pelo aquecimento e pelas condições ambientais, a lâmina d'água foi verificada a cada três dias; quando necessário, apenas água foi repostada, sem nova adição de água sanitária. Durante essas verificações, realizou-se também a inspeção visual da água do selo, não sendo observada a presença de larvas ou outros sinais de proliferação de insetos. Embora não tenham sido realizadas medições da concentração de cloro residual, a ausência de larvas indicou que a solução se manteve eficaz para fins de controle biológico durante o experimento.

3.3.4 Digestão Anaeróbia

Para o processo de digestão anaeróbia, o substrato utilizado foi esterco de porco, disponibilizado pelo Colégio Agrícola de Foz do Iguaçu, enquanto o inóculo foi fornecido pelo Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBiogás. A mistura foi preparada na proporção de 1:3 (dejeito suíno:inóculo), totalizando 2,1 litros — volume correspondente a aproximadamente 70% da capacidade total da câmara de fermentação (3 litros). Conforme descrito por Bastos et al. (2024), a proporção dejeito:inóculo e a ausência de adição de água visa assegurar adequada atividade microbiana e melhor aproveitamento do volume reacional.

O inóculo fornecido pelo CIBiogás, apresentou uma concentração de sólidos totais (ST) de 3,80% e sólidos voláteis (SV) de 65,9%. Para o presente estudo, considerando a ausência de análises laboratoriais do dejeito suíno *in natura*, adotou-se, com base em referências, um valor de 10% para a concentração de Sólidos Totais (Dupont et al., 2020; Bastos et al., 2024; Souza et al., 2009). Os Sólidos Voláteis foram estimados em 7,0%, correspondendo a 70% dos ST, valor este dentro da faixa reportada para dejetos suínos (Tietz et al., 2014). A mistura de dejeito suíno e inóculo na proporção 1:3 (dejeito:inóculo) resultou em uma concentração final de ST de 5,35%. Este cálculo foi realizado considerando o balanço de massa dos sólidos totais presentes em cada componente da mistura, conforme a Equação 1:

$$ST_{final} = \frac{((ST_{dejeito} * V_{dejeito}) + (ST_{inóculo} * V_{inóculo}))}{V_{total}} \quad (1)$$

Onde:

- ST_{final} = Sólidos Totais da mistura;
- $ST_{dejeito}$ = Sólidos Totais do dejeito;
- $V_{dejeito}$ = Volume do dejeito (1 parte);
- $ST_{inóculo}$ = Sólidos Totais do inóculo;
- $V_{inóculo}$ = Volume do inóculo (3 partes);
- V_{total} = Volume total da mistura (4 partes, correspondentes a 2,1 L — sendo 0,525 L de dejeito e 1,575 L de inóculo).

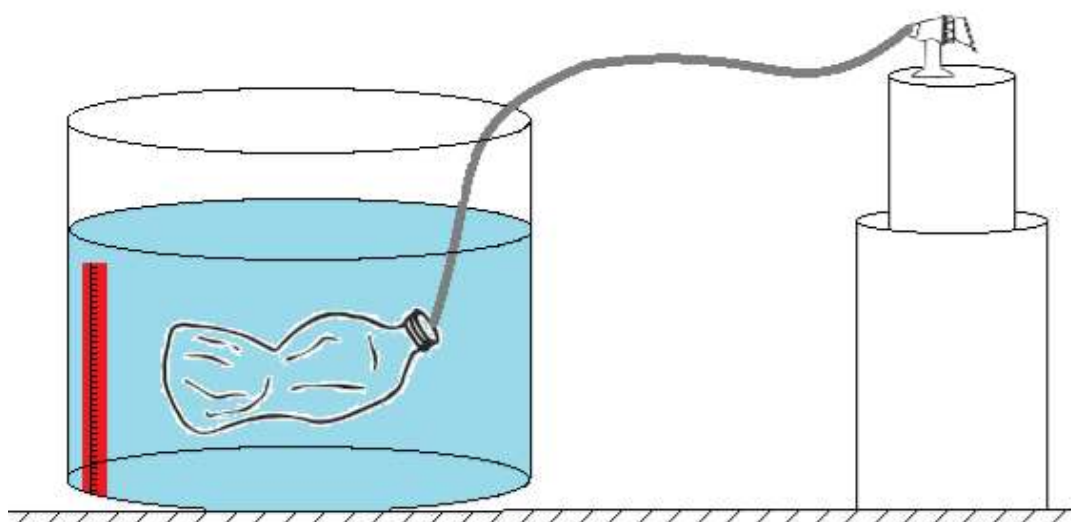
A partir desse cálculo, foram preparadas as bateladas e realizada a alimentação dos biodigestores. O acompanhamento experimental teve início logo após a alimentação dos bioreatores, sendo que as coletas de biogás tiveram início cinco dias após a alimentação. Essas coletas foram realizadas em intervalos regulares de dois em dois dias, exceto aos finais de semana, com o intervalo de três dias entre as coletas.

O experimento foi conduzido em um laboratório fechado, sem ar-condicionado, a fim de evitar interferências nas condições naturais do ambiente experimental. Essa escolha permitiu controlar melhor a variável do estudo, ao mesmo tempo em que manteve uma condição ambiental uniforme para a análise comparativa dos biodigestores.

3.3.5 Armazenamento e Quantificação do Gás Produzido

A extração e o armazenamento do biogás foram realizados utilizando um sistema adaptado para permitir a medição do volume produzido. Para isso, um equipo hospitalar foi conectado ao dispositivo de saída de gás do biodigestor, conduzindo o biogás até uma garrafa PET de 500 mL da marca Crystal (Coca-Cola®), do tipo utilizada para água com gás, selecionada por apresentar maior flexibilidade em comparação a outras marcas disponíveis no mercado. A Figura 3 ilustra o esquema do sistema de coleta do gás.

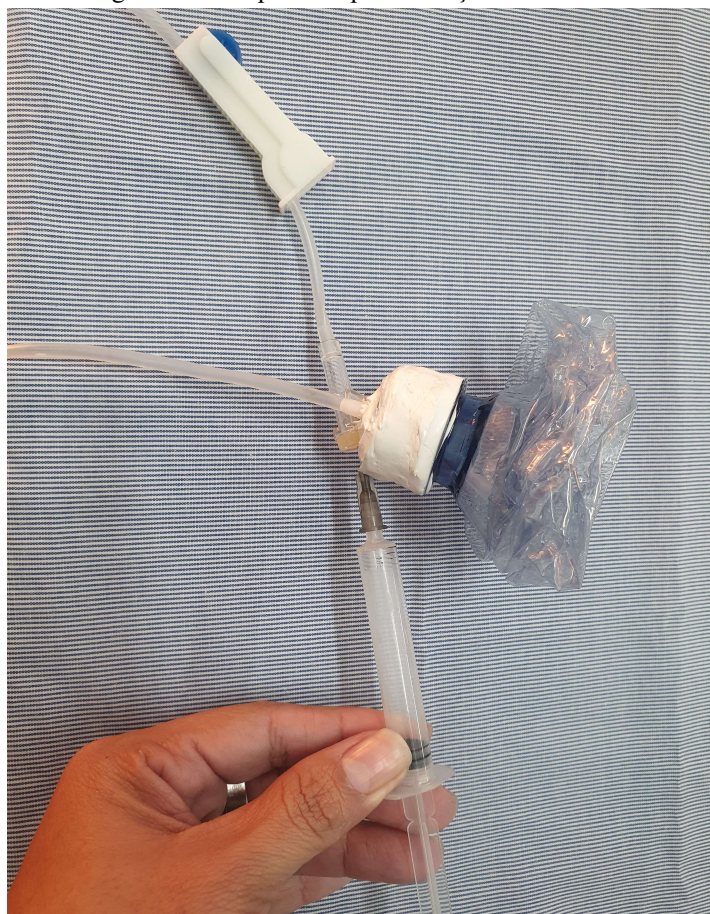
Figura 3—Esquema do sistema de coleta de biogás.



Fonte: Autoria própria (2025).

A garrafa foi previamente esvaziada e amassada, para remoção do ar. O sistema contou com um injetor lateral equipado com membrana autocicatrizante, permitindo a extração desse ar com o auxílio de uma seringa, conforme Fotografia 1.

Fotografia 1—Dispositivo para extração de ar residual.

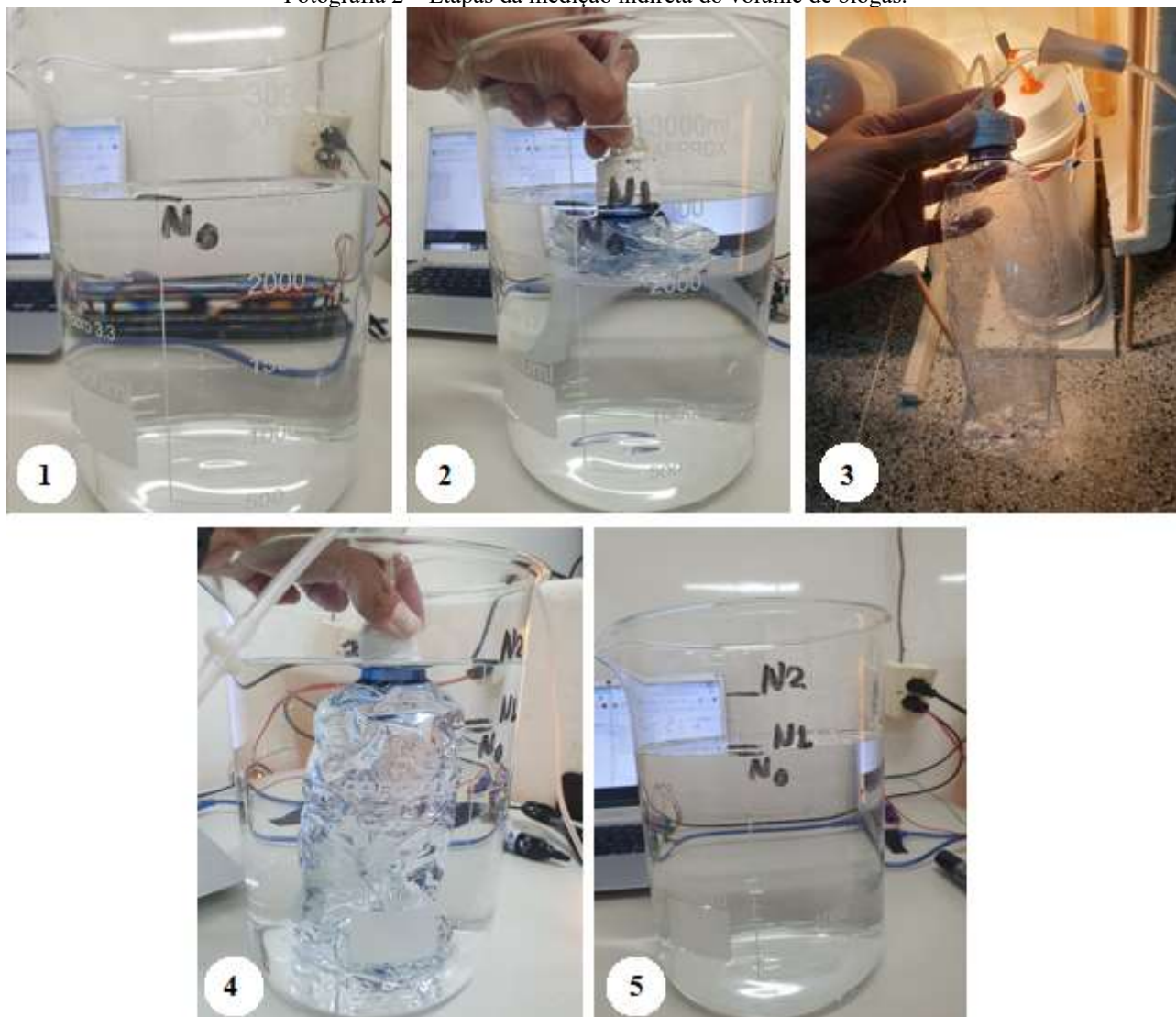


Fonte: Autoria própria (2025).

Durante as coletas, a garrafa era posicionada dentro de um béquer preenchido com água até a altura de 14 cm, valor definido para padronizar as medições. Apesar de a altura total da garrafa ser superior a esse valor, o mergulho era realizado apenas até o limite inferior da tampa. Essa profundidade era suficiente para mantê-la submersa, considerando que, devido à resistência do material, a garrafa não inflava completamente.

A Fotografia 2 apresenta as etapas do procedimento de medição indireta do volume de biogás. Inicialmente, registrava-se a altura da água no béquer (1). Em seguida, a garrafa vazia era submersa e o volume de água deslocado anotado (2). Depois, a garrafa era retirada e a torneira do biodigestor aberta para permitir a saída do biogás, inflando a garrafa, sendo a torneira novamente fechada para evitar o retorno do gás devido à pressão exercida pela água durante a submersão (3). Por fim, a garrafa inflada era submersa novamente no béquer e o novo volume de água deslocado registrado (4 e 5).

Fotografia 2—Etapas da medição indireta do volume de biogás.



Fonte: Autoria própria (2025).

A diferença entre os volumes de água deslocados com a garrafa vazia e a garrafa inflada correspondia ao volume real de biogás acumulado dentro da garrafa, permitindo assim o cálculo da produção de gás em cada biodigestor. Esse método de medição baseia-se no princípio do deslocamento de líquido, descrito pela Lei de Arquimedes, que estabelece que o volume de fluido deslocado por um corpo corresponde ao volume desse corpo imerso (Paiva, 2019). Essa técnica é amplamente utilizada para medições volumétricas de gases, conforme Girardi Neto et al. (2014), que aplicaram o método na quantificação de biogás em experimentos laboratoriais.

As medições, realizadas nos intervalos previamente mencionados, consistiam no registro periódico do deslocamento de líquido, utilizado para calcular o volume total de biogás produzido em cada biodigestor. A captura prosseguia até que o gasômetro atingisse o limite superior do biodigestor e a garrafa deixasse de inflar, indicando o término da produção no intervalo de coleta.

O procedimento foi aplicado a ambos os protótipos, utilizando sempre o mesmo béquer cilíndrico, com diâmetro de 15 cm e altura de 21 cm, onde a garrafa era submersa para a medição do deslocamento de água. Para o cálculo do volume de biogás ($V_{gás}$), utilizou-se a Equação 2. Dessa forma, cada variação no nível da água foi convertida diretamente em volume de biogás acumulado ao longo do tempo, permitindo a construção de gráficos para análise da produção gasosa.

$$V_{gás} = A * \Delta h \quad (2)$$

Onde:

- $V_{gás}$ = Volume de biogás;
- $A = \pi \times r^2 = \pi \times (7,5 \text{ cm})^2 \approx 176,7 \text{ cm}^2$ é a área da base do béquer;
- $\Delta h = h_{final} - h_{inicial}$, representa a variação da altura da coluna de água no béquer, em centímetros.

3.4 DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS ELETRÔNICOS DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE TEMPERATURA

Para o monitoramento e controle da temperatura, foram desenvolvidos dois sistemas eletrônicos independentes, ambos fundamentados na plataforma Arduino UNO R3. Cada sistema foi configurado com um sensor termistor NTC para aquisição de dados de temperatura, um *display* LCD 16x2 com interface I²C para visualização local e uma interface de comunicação serial, essencial para a integração com um *script* Python dedicado ao registro de dados em ambiente de nuvem.

3.4.1 Sistema de Monitoramento e Controle Térmico do Biodigestor

O sistema foi concebido especificamente para o controle térmico do biodigestor. O código-fonte (Anexo A), desenvolvido na Arduino IDE (versão 2.3.6), foi estruturado para executar as seguintes funções primordiais: Aquisição de Dados de Temperatura, Visualização Local e Remota da Temperatura, Controle Ativo da Temperatura, e Interoperabilidade com *script* Python.

A temperatura interna do biodigestor é mensurada por um termistor NTC, conectado à entrada analógica A1 do microcontrolador Arduino. A conversão do sinal analógico para valores em graus Celsius é realizada por meio da biblioteca *Elcereza_Thermistor_NTC.h*, garantindo a precisão da leitura (Anexo A, linha 28: *float temperatura = temp.getTempC();*).

Os dados de temperatura, juntamente com o *status* operacional do sistema, são apresentados em tempo real no *display* LCD integrado (linhas 45-57). Adicionalmente, a temperatura pode ser transmitida via monitor serial mediante solicitação, permitindo a coleta de

dados por sistemas externos (linhas 65-70: *Serial.print("BIO:"); Serial.println(temperatura, 1);*).

O gerenciamento da temperatura é efetuado por um módulo relé, conectado ao pino digital 7, que comanda um elemento de aquecimento (lâmpada). A lógica de controle emprega um mecanismo de histerese, ativando o aquecimento quando a temperatura decresce abaixo de um limite inferior (*tempMin*, configurado em 37 °C) e desativando-o ao atingir ou exceder um limite superior (*tempMax*, configurado em 40 °C). Este ciclo assegura a manutenção da temperatura dentro da faixa operacional desejada (linhas 31-40: *digitalWrite(relePin, HIGH);* e *digitalWrite(relePin, LOW);*).

A comunicação entre o Arduino e o *script* Python é estabelecida via porta serial. Ao receber o comando *GET_DATA*, o Arduino responde com uma *string* formatada (*BIO:<valor>*), contendo a leitura atual da temperatura, facilitando a identificação e o processamento dos dados pelo *software* externo (linhas 65-70).

3.4.2 Sistema de Monitoramento da Temperatura Ambiente

Um segundo sistema foi desenvolvido com o propósito de monitorar a temperatura do ambiente circundante ao experimento. Este módulo, de configuração mais simples, concentra-se na aquisição e exibição local da temperatura, bem como na sua transmissão serial para o *script* Python, complementando o conjunto de dados monitorados. O código-fonte detalhado pode ser consultado no Anexo B.

De maneira análoga ao sistema do biodigestor, a temperatura ambiente é capturada por um sensor termistor NTC, conectado à entrada analógica A1, e processada pela biblioteca *Elcereza_Thermistor_NTC.h* (Anexo B, linha 17: *float temperatura = temp.getTempC();*).

A temperatura ambiente é exibida em um *display* LCD, com atualizações a cada segundo (linhas 20-27), proporcionando uma leitura visual imediata das condições térmicas do entorno.

Similarmente ao primeiro sistema, a comunicação com o *script* Python ocorre via porta serial. Ao receber o comando *GET_DATA*, o Arduino transmite a temperatura ambiente atual em uma *string* formatada (*AMB:<valor>*), permitindo que o *script* Python distinga os dados provenientes deste módulo (linhas 22-26: *Serial.print("AMB:"); Serial.println(temperatura, 1);*).

3.4.3 Integração e Registro de Dados em Nuvem via *Script* Python

Ambos os sistemas Arduino convergem seus dados para um *script* Python centralizado (Anexo C), o qual desempenha um papel crucial na orquestração da coleta, armazenamento e disponibilização das informações. As principais funcionalidades do *script*

incluem: Coleta de Dados via Comunicação Serial, Armazenamento Local para Redundância, e *upload* para Plataforma de Nuvem (Google *Sheets*).

O *script* emprega a biblioteca *pyserial* para estabelecer e gerenciar as conexões com as portas seriais de ambos os módulos Arduino. Ele envia o comando *GET_DATA* para cada dispositivo e interpreta as respostas, diferenciando os dados do biodigestor e do ambiente por meio de prefixos específicos (*BIO:* ou *AMB:*), assegurando a correta associação das medições (Anexo C, função *ler_dados_arduino*).

Para garantir a integridade e a persistência dos dados, independentemente da conectividade com a nuvem, todas as medições de temperatura são automaticamente registradas em um arquivo CSV local (*backup_dados.csv*). Este mecanismo de *backup* assegura um histórico completo das medições (função *salvar_local*).

Os dados coletados são periodicamente enviados para planilhas no Google *Sheets*, utilizando a biblioteca *gsread* para a integração. A autenticação é realizada por meio de um arquivo de credenciais (*credenciais.json*), garantindo a segurança do acesso. Os dados são organizados em planilhas distintas para cada dispositivo, otimizando a visualização e a análise. O processo de *upload* é agendado para horários específicos (*HORARIOS_ENVIO*), balanceando a frequência de atualização com a otimização do uso da API.

Esta arquitetura de sistema, caracterizada pela modularidade dos componentes Arduino e pela centralização do processamento e armazenamento de dados no *script* Python, confere robustez e confiabilidade ao processo de coleta e disponibilização das informações de temperatura, elementos essenciais para a análise do desempenho do biodigestor e das condições ambientais do experimento.

3.5 PROPOSTA DIDÁTICA INTERDISCIPLINAR: BIODIGESTORES E ARDUINO NO ENSINO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

Na construção da proposta didática, o experimento com os biodigestores e o sistema Arduino foram analisados em consonância com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) e as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, a fim de identificar conteúdos e competências que pudessem ser abordados e explorados de forma interdisciplinar em diferentes áreas do conhecimento (Brasil (BNCC), 2018; Brasil (Resolução CNE/CEB nº 3), 2018).

Este mapeamento buscou evidenciar o potencial do experimento como um recurso didático para integrar as áreas de Ciências da Natureza (Química, Física e Biologia), Matemática e Tecnologia. Foram identificadas conexões potenciais que permitem a abordagem de conceitos fundamentais relacionados a processos químicos e biológicos (como a digestão anaeróbia e a microbiologia), princípios físicos (envolvendo termodinâmica, fluidos e eletrônica), análise e

modelagem de dados (estatística e funções), além de fundamentos de programação e automação (com o uso do Arduino) (SAE Digital, 2025; Nova Escola, 2022).

A abordagem proposta visa alinhar a prática experimental com as exigências curriculares contemporâneas, promovendo o ensino por investigação e a contextualização do conhecimento, conforme preconizado pela BNCC para o desenvolvimento de habilidades e competências nos estudantes do Ensino Médio (Educamundo, 2025).

3.6 PÚBLICO-ALVO E POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO

A proposta didática interdisciplinar apresentada neste estudo não foi aplicada em sala de aula, mas foi pensada como um modelo que pode ser adaptado por professores em diferentes contextos do ensino médio. A ideia é oferecer um recurso que auxilie no desenvolvimento de aulas que integrem conteúdos de Ciências da Natureza, Matemática e Tecnologia de forma prática e contextualizada, em sintonia com a BNCC.

O público-alvo principal são estudantes do ensino médio em geral, independentemente da modalidade de ensino. A proposta pode ser utilizada em escolas regulares, cursos técnicos, projetos de extensão, feiras de ciências ou até mesmo em oficinas e atividades extracurriculares. Sua flexibilidade permite que seja aplicada em diferentes realidades, tanto em ambientes com maior acesso a recursos tecnológicos quanto em contextos em que a temática da sustentabilidade pode ser explorada com materiais simples e acessíveis.

3.7 COLETA DE DADOS

A coleta de dados do experimento foi voltada para o monitoramento do desempenho dos biodigestores. Foram registradas as temperaturas interna e ambiente, de forma automática, por meio de sistemas eletrônicos baseados em Arduino. Os dados foram enviados para planilhas em nuvem e salvos localmente, garantindo cópias de segurança. Além disso, foi registrado periodicamente o volume de biogás produzido em cada biodigestor, utilizando o método indireto de deslocamento de líquido.

No que se refere ao aspecto educacional, não foi realizada a coleta de dados em sala de aula, uma vez que a proposta interdisciplinar teve caráter teórico e foi estruturada a partir do cruzamento entre conteúdos curriculares e a experiência prática do experimento.

3.8 ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados técnicos foi feita de forma simples e direta, considerando o

comportamento das temperaturas e a produção de biogás nos dois biodigestores. As temperaturas registradas foram organizadas em tabelas e gráficos, possibilitando comparar o sistema aquecido com o sistema em temperatura ambiente. Já os volumes de biogás foram analisados a partir das medições obtidas, também organizadas em tabelas e representadas graficamente, permitindo identificar tendências de produção em cada condição experimental.

A análise do aspecto educacional teve um caráter qualitativo. Como não houve aplicação de questionários ou atividades com turmas específicas, a proposta interdisciplinar foi analisada a partir da literatura e dos referenciais curriculares. Assim, a discussão foi feita de maneira descritiva, destacando como o experimento pode se integrar a diferentes disciplinas e contribuir no processo de ensino-aprendizagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) e do experimento realizado com dois biodigestores de bancada. A coleta de dados contemplou o monitoramento da temperatura interna e ambiente ao longo de 33 dias de digestão anaeróbia, bem como o registro da produção de biogás durante 28 dias de acompanhamento, iniciados no quinto dia após a alimentação dos biodigestores.

A duração do experimento alinha-se com a prática comum em estudos de biodigestão anaeróbia de dejetos suínos, onde tempos de retenção hidráulica (TRH) variam e são frequentemente ajustados aos objetivos da pesquisa. Embora a estabilização completa da produção de biogás não tenha sido atingida conforme critérios rigorosos de algumas normas (Norma VDI 4630), o período de monitoramento foi considerado adequado para a avaliação comparativa dos sistemas e para a obtenção de dados representativos. Trabalhos similares com dejetos suínos frequentemente empregam TRHs em torno de 30 dias (Embrapa, 2006), e alguns já utilizaram TRHs de 15, 22 e 29 dias para otimização do processo (Orrico Júnior et al., 2009), o que valida a duração adotada para os propósitos deste estudo.

Além dos aspectos experimentais, são apresentados também os resultados referentes à proposta didática interdisciplinar, na qual o experimento foi articulado às diretrizes do Ensino Médio, evidenciando as possibilidades de aplicação pedagógica nas áreas de Ciências da Natureza, Matemática e Tecnologia.

4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

No Quadro 2, as informações referentes aos artigos selecionados são apresentadas de forma organizada e sistemática. Esses trabalhos forneceram a base teórica necessária para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Quadro 2: Relação dos estudos.

Estudo	Autor(es)	Ano	Título do Artigo	Tema/Aspecto abordado	Principais Conclusões
1	KRETZER et al.	2015	Educação ambiental em gestão de resíduos e uso de biodigestor em escola pública de Florianópolis	Utilização dos compostos orgânicos e seu manejo para gerar alimento.	As tecnologias apresentadas e as intervenções realizadas contribuíram para o desenvolvimento do potencial dos recursos humanos e da natureza,

					através das ações práticas, proporcionando maior perspectiva para a juventude, como era o objetivo do trabalho, a gestão dos resíduos de forma participativa.
2	PRINCIVAL	2016	Desenvolvimento de um sistema computacional de monitoramento da produção do biogás por meio de sensores eletrônicos e Arduino	Desenvolvimento de um sistema computacional para o monitoramento contínuo e in situ da composição do biogás, utilizando sensores baseados na tecnologia de espectroscopia de infravermelho (NDIR)	O sistema computacional desenvolvido, utilizando a plataforma Arduino e sensores NDIR, foi eficiente no monitoramento da concentração de CO ₂ e CH ₄ no biogás, permitindo análise em tempo real por meio de gráficos.
3	MEYER; RIBEIRO; POMBO.	2017	Análise de viabilidade técnica de um sistema de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de dejetos suínos	Desenvolver um processo simples e eficiente de produção de biogás e tratamento de efluente, que propicie o aproveitamento energético da mistura gasosa e ao mesmo tempo valorize a sua aplicação como fonte renovável de energia.	O sistema desenvolvido utilizando Arduino é tecnicamente viável para ser implementado para geração de biogás e tratamento de dejetos animais, e com algumas melhorias poderiam potencializar a produção de biogás e otimizar o processo da biodigestão como um todo.
4	PEREIRA	2018	Um recurso didático para o ensino de energia baseado na plataforma Arduino	Uso da plataforma Arduino e da metodologia PBL (<i>Problem Based Learning</i>) para o ensino de Ciências, especificamente no contexto da disciplina APCC2 com foco no conceito de Energia	O guia elaborado no estudo, no formato de aplicativo para celular, pode ser uma ferramenta útil para os professores no ensino e aprendizagem do conteúdo de Energia, unindo as abordagens do Arduino e do PBL.
5	OLIVEIRA et al.	2018	Energia, Sociedade e Meio Ambiente no	A utilização da bioenergia obtida	A construção de um biodigestor de baixo custo e

			desenvolvimento de um Biodigestor: a interdisciplinaridade e a tecnologia Arduino para atividades investigativas	através da biodigestão de matéria orgânica.	a utilização do microcontrolador Arduino UNO para avaliar sua eficiência na produção de biogás proporcionaram uma maior motivação para a aprendizagem, envolvendo tecnologias relacionadas à energia renovável e sua relação com a sociedade e o meio ambiente.
6	FREITAS; FURTADO; CUEVAS.	2018	Construção de um biodigestor didático para a estação Ciências do Parque Tecnológico de Itaipú	Construção de um biodigestor didático com o objetivo de promover a educação em ciências, especificamente o ensino de formas alternativas de produção de energia, na educação básica.	A construção de um biodigestor didático proporcionou uma forma prática e visual de ensinar sobre a produção de biogás, promovendo o aprendizado dinâmico, a conscientização ambiental e a difusão do conhecimento sobre energias renováveis na educação básica.
7	RAMOS et al.	2018	Uso da plataforma Arduino na interdisciplinaridade do Ensino Fundamental I: Relato extensionista em uma escola pública	A implementação da Robótica Educacional como metodologia de ensino em escolas públicas.	A Robótica Educacional é uma solução educacional eficaz para auxiliar os estudantes de escolas públicas na assimilação de conteúdos extraclasse e no desenvolvimento de habilidades tecnológicas.
8	LIMA JÚNIOR et al.	2019	Atividades experimentais com Arduino abordando fundamentos da cinemática, termometria e eletrodinâmica na escola estadual de ensino médio Dr. Gabriel Sales Pimenta em Marabá (PA)	Utilização de placas de prototipagem, como o Arduino, como ferramentas auxiliares de ensino para o ensino de física no ensino médio.	A importância da inovação no ensino de física e o potencial das placas de prototipagem, como o Arduino, para enriquecer as práticas educacionais e tornar o ensino mais dinâmico e atrativo.
9	FERNANDES	2020	Instrumentação eletrônica com materiais alternativos para aulas experimentais	Investigação da literatura científica sobre o uso de	Foi observada a necessidade de incorporar as aulas práticas em metodologias

			de química: Uma revisão integrativa	instrumentação eletrônica com materiais alternativos para aulas experimentais de Química no Brasil nos últimos 10 anos.	didáticas mais abrangentes, como sequências didáticas, a fim de promover uma abordagem mais integrada no ensino de Química.
10	SOUZA et al.	2020	Desenvolvimento de incubadora de baixo custo com sistema de controle de temperatura para testes de potencial de produção de biogás	Desenvolvimento de uma incubadora com sistema de controle de temperatura utilizando o microcontrolador Arduino para realizar testes do potencial de produção de biogás através do processo de digestão anaeróbia de resíduos agropecuários.	O dispositivo proposto pode contribuir para os estudos do tratamento de resíduos agropecuários por meio da digestão anaeróbia, promovendo a sustentabilidade de sistemas produtivos, como a agropecuária e a agroindústria.
11	CARTAXO et al.	2020	Biodigestor caseiro como ferramenta metodológica para o ensino de educação ambiental nas escolas	Promover a conscientização dos alunos sobre a geração de resíduos sólidos orgânicos e a importância de seu correto destino.	Os estudantes puderam compreender os processos físicos, químicos e biológicos envolvidos na biodigestão anaeróbia, evidenciando a interdisciplinaridade da temática e a importância da educação ambiental como um campo de conhecimento abrangente.
12	CAMPOS	2020	Abordagem STEM: O desafio do planejamento e implementação na educação profissional de ensino médio.	Investigar como a abordagem STEM pode contribuir na articulação entre a formação geral e a formação técnica profissional de nível médio.	A abordagem STEM promove a integração de disciplinas, incentivando uma abordagem proativa. O uso do Arduino como tecnologia de automação despertou curiosidade nos alunos. Essa abordagem permitiu a aplicação prática do conhecimento e uma aprendizagem integrada.

13	MONTEIRO et al,	2022	Arduino no Ensino de Física: uma Revisão Sistemática de Literatura de 2011 a 2021	Compreender o uso do Arduino como recurso educacional no ensino da disciplina de Física.	Destaca-se que as regiões Sul e Sudeste do Brasil são as mais ativas no uso do Arduino como ferramenta nas aulas práticas de Física. Ressalta a importância de conduzir novos estudos empíricos utilizando o Arduino nesse contexto.
14	MARTINS et al.	2022	Atividades de Arduino no processo de ensino e aprendizagem nas aulas de ciências	O uso do Arduino foi relacionado ao estudo da ecologia e questões ambientais.	O uso do Arduino nas aulas de ciências possibilitou a aceleração do processo de decomposição em uma composteira, resultando em um composto orgânico de alta qualidade.

Fonte: Autoria própria (2025).

Após a análise dos trabalhos selecionados, foram identificados *insights* significativos que contribuíram para a compreensão do tema abordado. Os resultados revelaram uma variedade de abordagens e aplicações do Arduino, seja no controle e automação de biodigestores, seja no ensino de diversas disciplinas.

Observou-se uma crescente utilização do Arduino como ferramenta versátil e acessível, capaz de promover o monitoramento e controle de processos, bem como enriquecer o aprendizado dos alunos em diferentes áreas do conhecimento. Esses resultados fornecem uma base sólida para a compreensão do campo de estudo e podem auxiliar na identificação de lacunas e direções futuras para a pesquisa. Este estudo de RSL buscou responder duas questões de pesquisa essenciais relacionadas ao uso do Arduino em biodigestores e sua implementação nas escolas.

A primeira questão investigou as principais aplicações do Arduino em biodigestores e como essas aplicações contribuem para a automação e controle eficiente desses sistemas. Os resultados indicaram que o Arduino desempenha um papel crucial no monitoramento em tempo real de variáveis ambientais e na automação dos processos, resultando em um controle mais preciso e eficiente dos biodigestores (Princival, 2016; Meyer; Ribeiro; Pombo, 2017).

A segunda questão explorou como a implementação do estudo da automação de biodigestores com o Arduino nas escolas influencia a conscientização ambiental e a mudança de comportamento dos alunos em relação à sustentabilidade. Os achados evidenciaram que essa implementação promove a conscientização ambiental dos alunos, fornecendo uma abordagem

prática e multidisciplinar para a compreensão dos desafios e soluções relacionados à sustentabilidade (Kretzer et al., 2015; Oliveira et al., 2018). Além disso, estimula o desenvolvimento de habilidades de resolução de problemas, pensamento criativo e trabalho em equipe, preparando os alunos para se tornarem agentes de mudança em prol da sustentabilidade (Freitas; Furtado; Cuevas, 2018; Ramos et al., 2018).

Essas respostas reforçam a importância do Arduino e dos biodigestores no contexto ambiental e educacional, destacando seu potencial para impulsionar a automação sustentável e a conscientização ambiental nas escolas.

4.2 CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS BIODIGESTORES

Os protótipos de biodigestores foram desenvolvidos com foco na funcionalidade e replicabilidade, utilizando materiais acessíveis e um sistema de automação baseado em Arduino. Além da apresentação estrutural, considerou-se também o processo de alimentação inicial, realizado com a mistura de dejetos e inóculo previamente preparados, a fim de garantir as condições adequadas para o início da digestão anaeróbia. Esta seção apresenta os aspectos visuais, operacionais e de alimentação dos sistemas construídos, os quais servem de base tanto para a análise dos dados experimentais quanto para a discussão do potencial didático da proposta.

4.2.1 Protótipos Desenvolvidos

Foram construídos dois biodigestores em escala de bancada, ambos seguindo um modelo modular com tubos de PVC de diferentes diâmetros para compor a câmara de fermentação, o gasômetro e o selo hidráulico. Um dos protótipos foi equipado com um sistema de controle de temperatura automatizado, integrando um termistor, um módulo relé e uma lâmpada infravermelha, todos gerenciados por uma placa Arduino Uno R3. Este sistema permitiu a manutenção da temperatura interna na faixa mesofílica, importante para otimização da digestão anaeróbia. O segundo biodigestor operou sem controle térmico, servindo como grupo de comparação. A Fotografia 3 apresenta os principais materiais utilizados na montagem do protótipo.

Fotografia 3—Materiais utilizados na montagem do protótipo.



Fonte: Autoria própria (2025).

As Fotografias 4, 5 e 6 apresentam os protótipos construídos em escala de bancada. A Fotografia 4 corresponde ao biodigestor equipado com sistema de controle térmico automatizado, enquanto a Fotografia 5 mostra o biodigestor operando sem controle de temperatura. Já a Fotografia 6 foi obtida a partir do aplicativo da câmera de monitoramento, permitindo visualizar simultaneamente os dois protótipos, além do computador responsável pelo gerenciamento do sistema de monitoramento e controle térmico.

Fotografia 4—Biodigestor em escala de bancada equipado com sistema de controle térmico automatizado.



Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 5–Biodigestor em escala de bancada operando sem sistema de controle térmico.



Fonte: Autoria própria (2025).

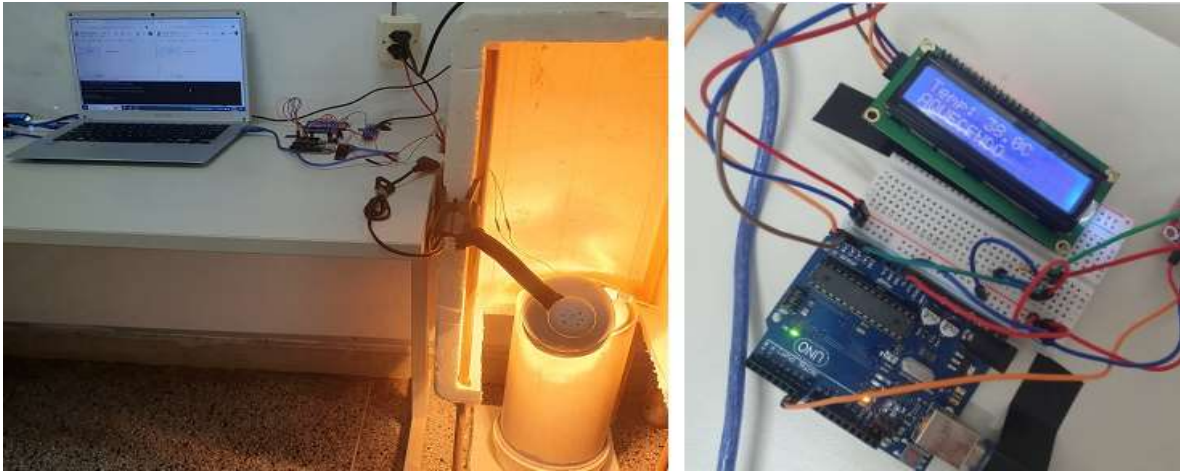
Fotografia 6–Visão simultânea dos dois biodigestores obtida pelo aplicativo da câmera de monitoramento, acompanhada do computador utilizado para gerenciamento do sistema de monitoramento e controle térmico.



Fonte: Autoria própria (2025).

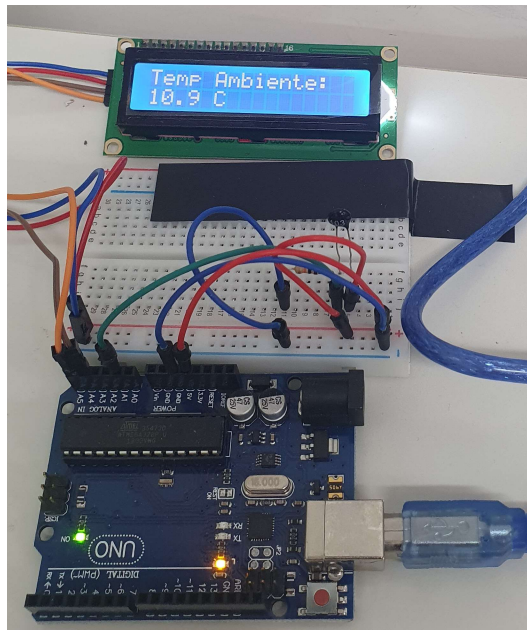
As Fotografias 7 e 8 apresentam os dispositivos de monitoramento implementados no experimento. A Fotografia 7 mostra o Arduino Uno R3 com *display* acoplado, empregado no sistema de controle térmico automatizado do biodigestor. No momento do registro, o *display* indicava 38 °C e a mensagem “aquecendo”, evidenciando o funcionamento do sistema dentro da faixa estabelecida de 37 °C a 40 °C. Já a Fotografia 8 corresponde ao sistema empregado para medição da temperatura ambiente, configurado para atuar como termômetro de referência externa.

Fotografia 7–Arduino Uno R3 com *display* acoplado ao sistema de controle térmico do biodigestor, indicando 38 °C e a mensagem “aquecendo”.



Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 8–Sistema com Arduino e *display* configurado para medição da temperatura ambiente.



Fonte: Autoria própria (2025).

A escolha de materiais e a utilização da plataforma Arduino demonstraram a viabilidade de replicação do projeto em ambientes educacionais. A construção dos protótipos, por si só, configurou uma atividade prática que reforça conceitos de engenharia, física e química, além de desenvolver habilidades de resolução de problemas. A funcionalidade dos sistemas de controle e coleta de dados, validada durante a fase experimental, permitiu a obtenção de resultados confiáveis para a análise da produção de biogás sob diferentes condições térmicas.

4.2.2 Caracterização e Otimização da Mistura Substrato-Inóculo

A concentração de Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV) da mistura substrato-inóculo é um fator crítico para a eficiência da biodigestão anaeróbia. Para o presente estudo, o dejetos suíno foi caracterizado com 10% de ST e 7,0% de SV (70% dos ST), valores que se alinham com faixas reportadas na literatura para este tipo de substrato (Tietz et al., 2014; Hasan et al., 2019; Embrapa, 2024). O inóculo, por sua vez, apresentou 3,80% de ST e 65,9% de SV. A mistura final, preparada na proporção 1:3 (dejetos:inóculo), resultou em uma concentração de ST de 5,35%. Esta concentração está em conformidade com as recomendações da literatura para otimização da biodigestão anaeróbia de dejetos suínos, que sugerem teores de sólidos totais entre 2,0% e 6,0% para um processo eficiente (Orrico Júnior et al., 2009; Souza; Lucas Júnior; Ferreira, 2005). A diluição e a proporção inóculo/substrato foram estabelecidas para criar um ambiente propício à atividade microbiana e à produção de biogás, conforme a prática comum para otimizar o processo (Orrico Júnior et al., 2009; Pinto, 2006).

4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Tabela 1 apresenta os resultados do monitoramento das temperaturas ambiente e interna do biodigestor durante o período de digestão anaeróbia. As medições foram realizadas em quatro horários fixos ao longo do dia, possibilitando acompanhar a variação térmica em diferentes momentos. A tabela reúne tanto os valores individuais registrados quanto as médias diárias, calculadas a partir dessas quatro medições, além da média geral de cada parâmetro. Essa organização permite visualizar de forma comparativa o comportamento térmico do ambiente e do sistema com automatização, evidenciando a estabilidade e os padrões de variação observados durante o experimento.

Tabela 1– Monitoramento da Temperatura (°C) Ambiente e Interna do Biodigestor Controlado.

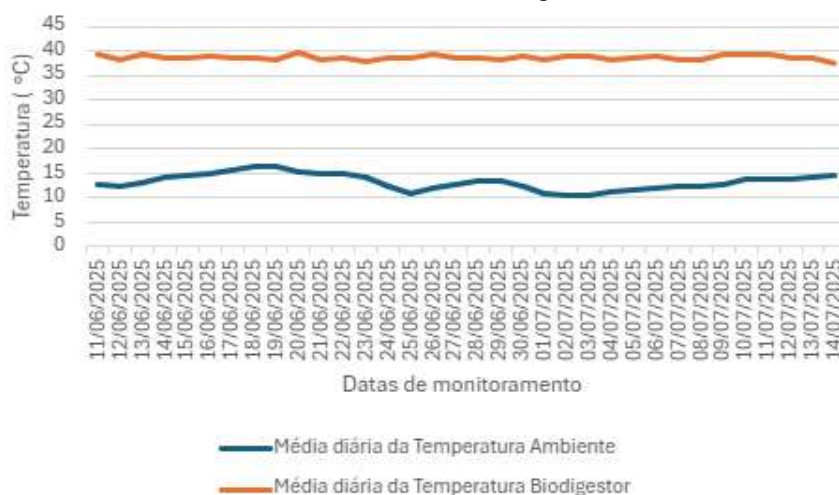
Data	Temperatura Ambiente				Temperatura Biodigestor				Temperatura Média Diária	
	4h	10h	16h	22h	4h	10h	16h	22h	Ambiente	Biodigestor
11/jun	-	-	-	12,8	-	-	-	39,4	12,8	39,4
12/jun	12,2	12,0	12,5	12,9	37,4	38,6	39,8	37,0	12,4	38,2
13/jun	12,6	12,5	13,0	13,9	40,0	37,6	40,1	40,0	13,0	39,4
14/jun	13,9	13,9	14,2	14,2	37,6	38,8	37,4	40,1	14,1	38,5
15/jun	14,0	14,9	15,1	14,9	39,3	37,1	37,4	40,0	14,7	38,5
16/jun	14,4	14,5	14,9	15,2	40,1	38,6	36,9	39,9	14,8	38,9
17/jun	15,4	15,5	15,9	16,1	37,6	37,4	40,1	39,3	15,7	38,6
18/jun	16,3	16,4	16,2	16,4	40,0	37,0	37,4	40,0	16,3	38,6
19/jun	16,8	16,6	16,4	16,1	37,8	38,0	36,9	39,7	16,5	38,1

20/jun	15,7	15,3	15,2	15,0	40,0	39,8	38,6	40,1	15,3	39,6
21/jun	14,9	14,7	14,9	14,8	38,7	36,9	39,6	37,2	14,8	38,1
22/jun	14,8	14,7	15,1	15,4	37,7	38,8	40,0	37,7	15,0	38,6
23/jun	15,1	14,6	13,9	13,9	38,3	37,3	39,2	37,2	14,4	38,0
24/jun	13,1	12,0	12,0	11,7	39,5	38,4	39,4	37,6	12,2	38,7
25/jun	11,0	9,6	11,1	11,4	37,6	39,2	37,7	40,1	10,8	38,7
26/jun	11,8	12,1	12,2	12,5	40,0	39,6	40,1	37,2	12,2	39,2
27/jun	12,4	12,2	12,7	12,9	36,9	40,0	38,2	39,4	12,6	38,6
28/jun	12,9	13,0	13,4	13,9	40,1	39,6	37,2	37,9	13,3	38,7
29/jun	14,0	13,6	13,4	13,3	38,1	37,9	37,2	39,1	13,6	38,1
30/jun	12,9	12,6	12,3	12,0	37,6	38,3	39,2	40,1	12,5	38,8
01/jul	11,5	10,7	10,7	10,6	38,3	39,3	36,9	37,7	10,9	38,1
02/jul	10,3	9,9	10,6	10,8	39,1	37,2	39,4	40,0	10,4	38,9
03/jul	10,3	10,1	10,6	11,0	40,1	39,4	37,8	38,4	10,5	38,9
04/jul	11,0	10,8	11,6	11,7	38,5	39,6	37,2	37,5	11,3	38,2
05/jul	11,5	11,3	12,0	12,1	38,7	37,5	38,8	39,1	11,7	38,5
06/jul	11,8	11,6	12,2	12,5	36,9	39,5	40,1	39,6	12,0	39,0
07/jul	12,4	12,1	12,5	12,5	39,2	36,9	38,5	37,8	12,4	38,1
08/jul	12,0	11,9	12,8	12,9	37,3	39,9	36,9	38,3	12,4	38,1
09/jul	12,7	12,3	12,9	13,5	40,0	37,0	39,6	40,0	12,9	39,2
10/jul	13,3	13,9	13,6	13,8	40,1	37,2	39,5	40,0	13,7	39,2
11/jul	13,5	13,9	13,6	13,8	40,1	37,8	39,2	39,5	13,7	39,2
12/jul	13,5	13,3	13,9	13,9	40,0	40,1	37,2	37,8	13,7	38,8
13/jul	13,9	14,0	14,4	14,6	40,1	37,8	36,9	40,1	14,2	38,7
14/jul	14,4	14,4	-	-	37,8	36,9	-	-	14,4	37,4
Temperatura Média Geral									13,3	38,6

Fonte: Aatoria própria (2025).

A temperatura ambiente apresentou variações diárias, com médias oscilando entre 10,4°C e 16,5°C, enquanto a temperatura interna do biodigestor manteve-se mais estável, com médias diárias variando de 37,4°C a 39,6°C, conforme é apresentado no Gráfico 1. A média geral da temperatura ambiente foi de 13,3°C, enquanto a do biodigestor foi de 38,6°C, indicando que o sistema conseguiu manter uma condição térmica adequada para a produção de biogás, independentemente das flutuações externas.

Gráfico 1–Média diária das temperaturas.



Fonte: Autoria própria (2025).

Particularmente, observou-se que nos dias com médias de temperaturas ambiente mais baixas (como 02/07, com média de 10,4°C), o sistema manteve eficiência térmica, registrando média de 38,9°C no biodigestor — 0,3°C acima da média geral de 38,6°C para todo o período.

Quanto à produção de biogás, observaram-se diferenças significativas entre o biodigestor operado à temperatura ambiente (Biodigestor 1) e aquele com controle térmico (Biodigestor 2). A Tabela 2 apresenta os volumes produzidos em ambos durante os 33 dias de monitoramento, bem como a diferença entre eles. A diferença percentual na produção de biogás entre os biodigestores foi calculada conforme a Equação 3, considerando o volume produzido pelo biodigestor com controle de temperatura (B2) em relação ao sem controle (B1).

$$Diferença(\%) = \frac{B2 - B1}{B1} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

- Diferença (%) = Diferença na produção do biogás (%);
- B1 = volume de biogás produzido pelo biodigestor sem controle de temperatura (mL);
- B2 = volume de biogás produzido pelo biodigestor com controle de temperatura (mL).

Valores positivos indicam maior produção no biodigestor com controle de temperatura, enquanto valores negativos representam maior produção no biodigestor à temperatura ambiente.

Tabela 2– Produção de biogás (mL) para cada biodigestor.

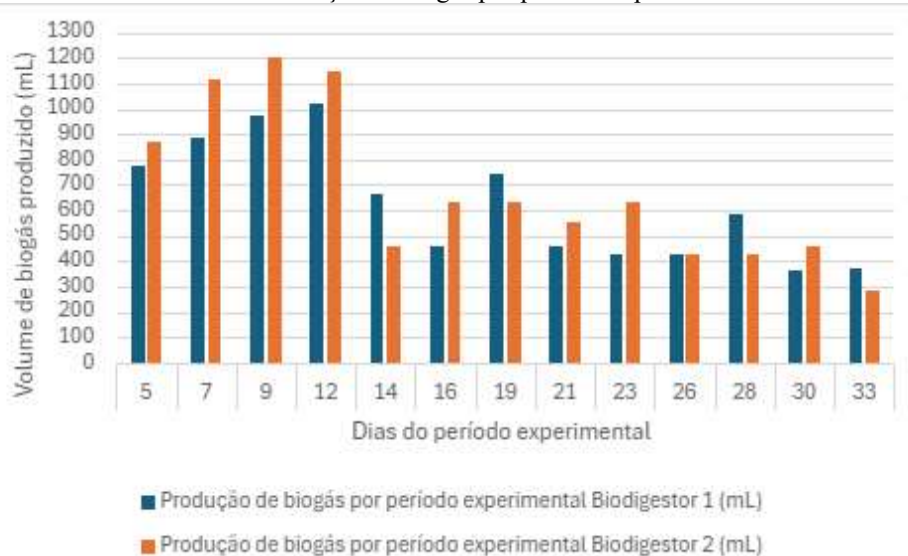
Dia experimental	Data	Produção de biogás (mL)		Diferença na produção do biogás (%)
		Biodigestor 1	Biodigestor 2	
5º	16/06/2025	777,5	866,0	11,4

7°	18/06/2025	883,5	1.113,2	26,0
9°	20/06/2025	971,9	1.201,6	23,6
12°	23/06/2025	1.020,3	1.150,8	12,8
14°	25/06/2025	665,8	459,9	-30,9
16°	27/06/2025	459,9	635,0	38,1
19°	30/06/2025	741,4	635,0	-14,4
21°	02/07/2025	459,9	555,1	20,7
23°	04/07/2025	424,1	635,0	49,7
26°	07/07/2025	424,1	424,1	0,0
28°	09/07/2025	583,1	424,1	-27,3
30°	11/07/2025	365,8	459,9	25,7
33°	14/07/2025	371,6	283,4	-23,7

Fonte: Autoria própria (2025).

No início do experimento (5° dia), o biodigestor com controle da temperatura produziu 866,0 mL de biogás, enquanto o biodigestor sem o sistema de controle produziu 777,5 mL, uma diferença de 11,4% na produção do gás no sistema controlado, como é possível perceber no Gráfico 2. Essa tendência se manteve nos dias subsequentes, com picos de diferença percentual positivo, como 26% no 7° dia e 49,7% no 23° dia, indicando maior eficiência do biodigestor 2, na maior parte do experimento. Essa diferença pode ser atribuída à manutenção da temperatura dentro da faixa ideal para a atividade microbiana metanogênica, favorecendo a produção do biogás. Estudos indicam que biodigestores operando em temperaturas mesofílicas apresentam maior eficiência na produção de biogás quando comparados àqueles mantidos em temperaturas mais baixas (Miranda; Amaral; Lucas Júnior, 2006; Corrêa et al, 2020; GEF Biogás Brasil, 2021).

Gráfico 2—Produção de biogás por período experimental.



Fonte: Autoria própria (2025).

No entanto, em alguns dias, como o 14º e o 19º, o biodigestor 1 superou o sistema com controle da temperatura, com produção de gás 30,9% e 14,4%, respectivamente, superior ao sistema 2. Embora a temperatura ambiente média tenha se mantido relativamente constante, variações pontuais na produção de biogás em biodigestores de batelada podem ocorrer devido a flutuações no pH, na alcalinidade ou ao acúmulo transitório de ácidos voláteis, que influenciam a atividade microbiana e a liberação do gás (Marcucci, 2018; Almeida, 2020; Araujo, 2022; Orrico Júnior et al., 2010).

Outro ponto importante a se considerar a partir dos resultados, é que o controle da temperatura mostrou maior impacto nos primeiros 12 dias da digestão. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que, no início do processo, os microrganismos consomem os componentes mais facilmente degradáveis do substrato, como carboidratos, proteínas e lipídios, o que favorece uma produção maior de biogás. Com o passar do tempo, a matéria disponível torna-se mais difícil de decompor, resultando em uma produção menor (Okamura, 2013).

A análise da produção acumulada de biogás, Tabela 3, reforçou a vantagem do controle da temperatura do biodigestor. Ao final do experimento (33º dia), o biodigestor 2 teve uma produção de biogás de 8.843,1 mL, enquanto o biodigestor 1 produziu 8.148,9 mL.

Tabela 3– Produção de biogás (mL) acumulada.

Dia Experimental	Data	Biodigestor 1 (mL)	Biodigestor 2 (mL)	Diferença Acumulada (mL)	Vantagem do Biodigestor 2 (%)
5º	16/06/2025	777,5	866	88,5	11,4
7º	18/06/2025	1661	1979,2	318,2	19,2

9°	20/06/2025	2632,9	3180,8	547,9	20,8
12°	23/06/2025	3653,2	4331,6	678,4	18,6
14°	25/06/2025	4319	4791,5	472,5	10,9
16°	27/06/2025	4778,9	5426,5	647,6	13,6
19°	30/06/2025	5520,3	6061,5	541,2	9,8
21°	02/07/2025	5980,2	6616,6	636,4	10,6
23°	04/07/2025	6404,3	7251,6	847,3	13,2
26°	07/07/2025	6828,4	7675,7	847,3	12,4
28°	09/07/2025	7411,5	8099,8	688,3	9,3
30°	11/07/2025	7777,3	8559,7	782,4	10,1
33°	14/07/2025	8148,9	8843,1	694,2	8,5

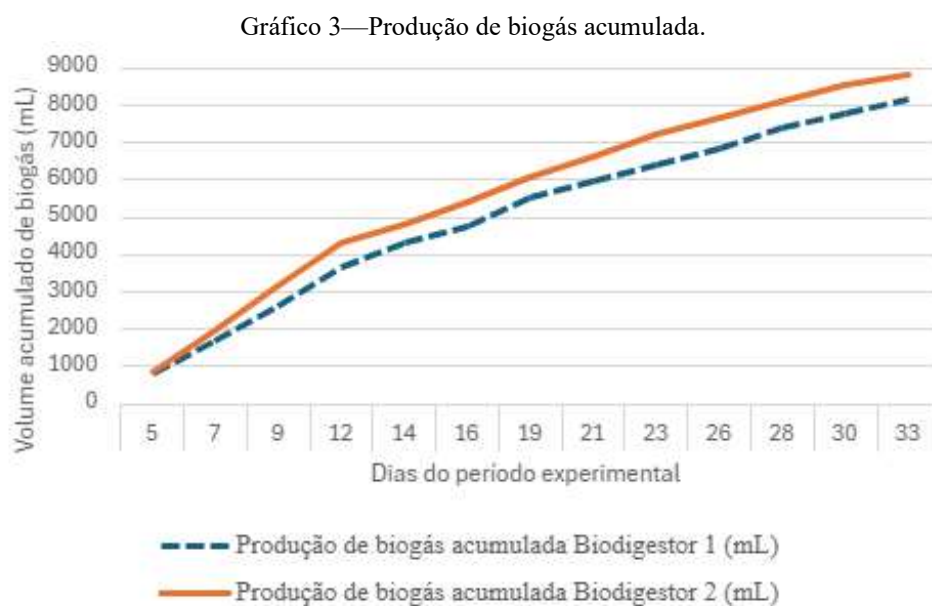
Fonte: Autoria própria (2025).

A análise revelou também que a vantagem do sistema controlado foi mais expressiva na fase intermediária, alcançando uma produção 20,8% superior, no 9º dia do experimento. No entanto, essa diferença na produção reduziu para 8,5% no final do experimento, indicando que, embora o controle da temperatura tenha se mostrado eficiente na produção do gás, o sistema sem o controle da temperatura também alcançou produção satisfatória do gás. Esse efeito pode ser atribuído ao fato de que microrganismos, como bactérias, possuem uma notável capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais, incluindo variações de temperatura (Fapeam, 2008; Romeu et al, 2021).

Estudos demonstram que, mesmo fora da faixa de temperatura ótima, muitas espécies bacterianas podem se desenvolver e manter sua atividade metabólica, ajustando-se a novas condições desde que as flutuações não sejam abruptas ou extremas (Fasolin et al., 2016). A estabilidade térmica é um fator crucial para a eficiência da produção de biogás, pois o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pelo processo de decomposição é diretamente influenciado pela temperatura (Gonçalves, 2018; Tavares et al., 2016). No entanto, a capacidade de adaptação desses microrganismos permite que o processo continue, mesmo em condições que não são as ideais, desde que haja uma certa estabilidade no ambiente (Romeu et al, 2021).

Adicionalmente, a condução do experimento em ambiente fechado contribuiu para atenuar variações térmicas externas, garantindo maior estabilidade ao biodigestor sem controle de temperatura. Embora a temperatura externa influencie a interna, o isolamento reduziu a magnitude das flutuações, favorecendo a adaptação microbiana e permitindo uma produção satisfatória de

biogás, como evidenciado no Gráfico 3.



Fonte: Autoria própria (2025).

Esses resultados reforçam a importância do controle de temperatura para otimizar a produção de biogás em biodigestores de pequeno porte, demonstrando que a manutenção de condições ambientais adequadas influencia diretamente a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia.

Para a análise da produção de biogás entre os dois biodigestores, utilizou-se a Análise de Variância (ANOVA) de um fator. É fundamental ressaltar que o ANOVA é um teste estatístico paramétrico que se baseia em algumas premissas para que seus resultados sejam válidos e confiáveis. As principais premissas são a normalidade dos resíduos, a homogeneidade das variâncias entre os grupos e a independência das observações (Kim, 2017; Emerson, 2022).

Inicialmente, foram realizados testes para verificar a normalidade e a homogeneidade das variâncias dos dados de produção de biogás dos Biodigestores 1 e 2. O Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk foi aplicado para avaliar se os dados de cada biodigestor seguiam uma distribuição normal (Shapiro; Wilk, 1965; Scipy, 2008). A hipótese nula desse teste é que os dados são normalmente distribuídos. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos:

Tabela 4— Resultados do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk.

Biodigestor	Estatística W	p-valor	Interpretação
Biodigestor 1	0,897	0,120	$p > 0,05 \rightarrow$ distribuição normal
Biodigestor 2	0,878	0,066	$p > 0,05 \rightarrow$ distribuição normal

Fonte: Autoria própria (2025).

Como os p-valores para ambos os biodigestores (0,120 para o Biodigestor 1 e 0,066 para o Biodigestor 2) foram superiores a 0,05, não se rejeitou a hipótese nula. Isso indica que

os dados de produção de biogás de ambos os grupos podem ser considerados normalmente distribuídos, atendendo a essa premissa para o ANOVA.

Em seguida, verificou-se a Homogeneidade das Variâncias utilizando o Teste de Levene (Levene, 1960; Nist/Sematech, 2021). Este teste avalia se as variâncias dos grupos são estatisticamente iguais. A hipótese nula é que as variâncias são homogêneas. O resultado foi uma estatística de Levene de 0,283 com um p-valor de 0,600. Visto que o p-valor (0,600) é maior que 0,05, conclui-se que as variâncias entre os dois grupos são homogêneas, satisfazendo mais uma premissa do ANOVA.

Com as premissas de normalidade e homogeneidade de variâncias atendidas, procedeu-se com a Análise de Variância (ANOVA) de um fator. Os resultados estão sumarizados na Tabela 5:

Tabela 5– Resultados da Análise de Variância (ANOVA) para a Produção de biogás.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrado Médio (QM)	Estatística F	p-valor
Entre Grupos	18.535,14	1	18.535,14	0,251	0,621
Dentro dos Grupos	1.773.040,00	24	73.876,68		
Total	1.791.575,00	25			

Fonte: A autoria própria (2025).

A análise dos resultados da produção de biogás revelou que, embora o biodigestor com controle de temperatura tenha demonstrado vantagens em determinados momentos, a diferença geral na produção entre os dois sistemas não foi estatisticamente significativa. Conforme o p-valor obtido (0,6210), superior ao nível de significância predefinido ($\alpha = 0,05$), não há evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese nula de que as médias de produção de biogás dos dois biodigestores são equivalentes (Seltman, 2018). Este achado sugere que, mesmo sem controle ativo de temperatura, o Biodigestor 1 apresentou uma produção de gás satisfatória, possivelmente devido à estabilidade das condições ambientais durante o período experimental, conforme discutido anteriormente.

Apesar desses resultados, é importante destacar algumas considerações metodológicas associadas ao delineamento experimental e à natureza dos dados coletados que podem influenciar a interpretação estatística dos resultados obtidos. A premissa de independência das observações é crucial para o ANOVA tradicional (Kim, 2017; Emerson, 2022). Neste experimento, a coleta de dados não foi diária, ocorrendo em intervalos de 2 a 3 dias, e as medições foram realizadas nos mesmos biodigestores ao longo do tempo. Essa característica pode gerar correlação entre as observações, ou seja, dependência dos dados. Tal dependência é problemática para o ANOVA tradicional, pois pode subestimar o erro padrão das médias, levando a um p-valor

incorretamente baixo e, conseqüentemente, a uma conclusão equivocada de significância (Kenny; Judd, 1986).

Para dados com medidas repetidas, em que as observações são feitas nos mesmos sujeitos em diferentes momentos, metodologias estatísticas mais apropriadas incluem o ANOVA de Medidas Repetidas ou os Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMM). Esses métodos consideram explicitamente a correlação entre as observações ao longo do tempo (Muhammad, 2023; Laerd Statistics, 2018). Entretanto, no presente caso, com apenas 13 pontos de dados por biodigestor e intervalos de coleta irregulares, a aplicação e interpretação de um ANOVA de Medidas Repetidas ou GLMM seriam desafiadoras, devido ao tamanho da amostra e à complexidade do modelo.

Considerando essa limitação e buscando uma análise mais robusta diante da possível dependência dos dados, aplicou-se também o Teste de Mann-Whitney U — um teste não paramétrico que não assume normalidade e é menos sensível a violações da independência, sendo adequado para comparar duas amostras (Mann; Whitney, 1947). Os resultados foram:

- Estatística: 77,000
- p-valor: 0,692

Assim como no ANOVA, o p-valor de 0,692 (maior que 0,05) indica que não há diferença estatisticamente significativa na produção de biogás entre os biodigestores. Esse resultado corrobora a conclusão do ANOVA, porém com menos premissas rigorosas, reforçando a ausência de diferença estatisticamente comprovada.

Em suma, embora as premissas de normalidade e homogeneidade de variâncias tenham sido atendidas, a dependência temporal dos dados constitui uma limitação relevante. O ANOVA de um fator foi utilizado para uma comparação geral da produção de biogás entre os dois biodigestores. Para futuras pesquisas, recomenda-se uma coleta de dados mais estruturada, com maior número de pontos no tempo, permitindo a aplicação de ANOVA de Medidas Repetidas ou GLMM, que poderiam analisar a trajetória da produção ao longo do tempo.

Nesse contexto, a análise integrada dos resultados permitiu identificar três fases distintas na produção de biogás, correlacionadas à dinâmica de degradação do substrato:

- Fase inicial (dias 5–12): marcada pela maior vantagem do biodigestor com controle de temperatura (pico de 20,8% no 9º dia), associada à degradação dos componentes mais lábeis do substrato, indicando alta atividade microbiana e rápida produção de gás.
- Fase intermediária (dias 14–23): caracterizada por maior variabilidade, com alternância na

vantagem entre os sistemas, sugerindo uma fase de transição em que a disponibilidade de substrato e as condições ambientais influenciaram de forma mais complexa a produção.

- Fase final (dias 26–33): evidenciou a convergência progressiva dos sistemas, indicando exaustão do material degradável e diminuição na taxa de produção de biogás, o que sinaliza o encerramento do processo de biodigestão.

Além da produção de biogás, o digestato, subproduto do processo de biodigestão anaeróbia, possui valor como biofertilizante, sendo rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio. Contudo, sua utilização na agricultura não é um processo simples e exige rigor técnico e regulatório (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022). A composição do digestato é variável, dependendo da matéria-prima e das condições operacionais, o que implica a necessidade de análises físico-químicas e microbiológicas para determinar seu valor fertilizante e a presença de potenciais contaminantes (Simon, 2020).

É crucial realizar testes para verificar a concentração de macronutrientes e micronutrientes, bem como a presença de metais pesados e patógenos, que podem ser tóxicos para as plantas, acumular-se no solo e na cadeia alimentar, ou representar riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Além disso, a fitotoxicidade, causada por compostos como a amônia em altas concentrações, deve ser avaliada por meio de testes de germinação e crescimento de plantas (Simon, 2020). No Brasil, a aplicação agrícola de resíduos orgânicos é regulamentada por normas como a Instrução Normativa nº 61/2020 do MAPA, que estabelece limites para contaminantes e exige análises específicas (MAPA, 2020). Em muitos casos, tratamentos adicionais, como separação de fases ou higienização, são necessários para otimizar o digestato e mitigar riscos, garantindo sua segurança e eficácia como biofertilizante (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022). A gestão inadequada do digestato, quando o aproveitamento agrícola não é viável, deve seguir rigorosamente as regulamentações ambientais para evitar impactos negativos.

Em suma, o digestato é uma oportunidade valiosa para a agricultura sustentável, mas sua aplicação exige caracterização detalhada, conformidade regulatória e, se necessário, tratamento adequado para maximizar benefícios e evitar riscos.

4.4 PROPOSTA DIDÁTICA INTERDISCIPLINAR

O tema dos biodigestores, aliado ao uso do Arduino, cria um espaço interessante para práticas interdisciplinares. Os biodigestores envolvem processos químicos, físicos e biológicos na transformação de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizantes (Biogaseenergia, 2024; Governo do Brasil, 2022). Já o Arduino é uma ferramenta acessível que possibilita o

desenvolvimento de sistemas de monitoramento e controle, trazendo para a sala de aula conceitos de eletrônica, programação e automação (Arduino, 2024).

A proposta didática apresentada aqui surgiu a partir dos resultados do experimento com os biodigestores, em que um deles foi monitorado com o uso do Arduino para controle de temperatura. A experiência, junto com os dados coletados, mostrou-se um material muito rico para pensar em atividades pedagógicas que aproximem os conteúdos do ensino médio da realidade dos estudantes. A ideia é oferecer um exemplo de como esse tipo de projeto pode ser trabalhado em sala de aula, integrando conhecimentos de química, física, biologia, matemática, sustentabilidade e tecnologia, em sintonia com o que a BNCC orienta sobre a importância da aprendizagem contextualizada (Brasil, 2018).

Trabalhar os conteúdos de forma integrada é essencial para que os alunos compreendam melhor os fenômenos do mundo atual. A BNCC reforça essa necessidade ao destacar a importância de superar a fragmentação do ensino e buscar estratégias que aproximem teoria e prática (Brasil, 2018). Nesse sentido, metodologias ativas, como a Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP), são muito úteis, pois colocam o estudante como protagonista, incentivando a pesquisa, a colaboração e a resolução de problemas reais (Educação, 2024).

O experimento com os biodigestores e o sistema Arduino pode servir como ponto de partida para várias atividades interdisciplinares, conectando as áreas de Ciências da Natureza, Matemática e Tecnologia. A seguir, apresentam-se as principais conexões:

- Ciências da Natureza (Química, Física e Biologia)

Química: A digestão anaeróbia envolve reações bioquímicas sucessivas (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) responsáveis pela formação do biogás (principalmente metano e dióxido de carbono). A análise da composição do biogás, o estudo da matéria orgânica (substrato) e a caracterização dos subprodutos (biofertilizantes) são oportunidades para aplicar conteúdos de química orgânica e ambiental (Karlsson, 2014; Shubeita, 2016).

Física: O deslocamento de líquido para medir o volume de biogás remete a princípios da pressão, do empuxo e da densidade (Girardi Neto et al., 2014; Paiva, 2019). Já o sistema de aquecimento controlado por Arduino possibilita a discussão de conceitos de termodinâmica, transferência de calor e eficiência energética. A eletrônica associada (sensores, relés e atuadores) permite ainda explorar circuitos e leis fundamentais da física (Moreira; Romeu; Alves, 2018).

Biologia: Os microrganismos anaeróbios são protagonistas do processo, tornando

possível a exploração da microbiologia, da ecologia microbiana e da importância da diversidade biológica na eficiência do sistema (Karlsson, 2014). Além disso, a relação entre biodigestores, sustentabilidade, gestão de resíduos e energias renováveis conecta o conteúdo às discussões sobre educação ambiental (Kretzer et al., 2015; Biogaseenergia, 2024; Matsuda, 2024).

- Matemática

Análise de dados: Os registros de produção de biogás e variação de temperatura permitem cálculos estatísticos (médias, desvio-padrão, coeficiente de variação) e a construção de gráficos (linhas, barras, dispersão).

Modelagem matemática: É possível trabalhar relações funcionais entre temperatura e produção de biogás, explorando modelos lineares ou exponenciais simples.

Proporções e cálculos: O preparo do substrato (dejetos + inóculo) exige cálculos de razão, proporção e concentração, incluindo a determinação de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) (Guimarães; Maia, 2020).

- Tecnologia (Arduino e Programação)

Programação e lógica: O Arduino possibilita o aprendizado de lógica computacional e fundamentos de programação em C/C++, com aplicações práticas no controle de sensores e atuadores (Jeranoski, 2023).

Eletrônica básica: A montagem dos circuitos (placa, resistores, sensores, relés) introduz noções fundamentais de corrente, tensão e resistência, além de princípios de prototipagem eletrônica.

Automação e controle: O sistema de aquecimento do biodigestor é um exemplo prático de automação, ilustrando como a tecnologia pode otimizar processos e contribuir para soluções sustentáveis (Aparecido et al, 2024).

4.4.1 Estrutura da Proposta Didática

A proposta pode ser organizada em módulos, de modo a facilitar a adaptação pelos professores a diferentes realidades. Segue uma sugestão:

- Módulo Introdutório – Problematização dos desafios ambientais (ODS, resíduos, energia) e introdução aos biodigestores.
- Módulo de Construção – Montagem de um biodigestor em pequena escala (versão simplificada).
- Módulo de Monitoramento e Análise – Uso do Arduino para registrar variáveis

(temperatura, biogás) e posterior análise estatística dos dados.

- Módulo de Otimização e Automação – Implementação do controle de temperatura e discussão sobre eficiência energética.
- Módulo de Discussão e Aplicação – Reflexão sobre impactos sociais, econômicos e ambientais do biogás, relacionando a soluções locais e globais.

4.4.2 Detalhamento das Atividades Práticas

As atividades práticas podem ser planejadas para aprofundar o conteúdo de cada área:

- Química: Determinação de ST e SV; monitoramento do pH; estudo da composição do biogás e sua relação com estequiometria e propriedades dos gases.
- Física: Estudo da termodinâmica aplicada ao aquecimento; análise do deslocamento de líquido no gasômetro pelo Princípio de Arquimedes; exploração de conceitos de eletricidade (Lei de Ohm, circuitos simples).
- Biologia: Identificação dos grupos de microrganismos atuantes na digestão anaeróbia; relação com os ciclos biogeoquímicos (carbono e nitrogênio); impactos da biodigestão na redução de emissões.
- Matemática: Aplicação de estatística descritiva; modelagem da relação entre variáveis; cálculos de diluições e proporções no preparo do substrato.

4.4.3 Metodologias Pedagógicas Recomendadas

- Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP): Estruturação em fases com equipes multidisciplinares, atribuindo papéis distintos aos estudantes conforme seus interesses.
- Ensino por Investigação: Organização em torno de questões-problema (ex.: “Como a temperatura influencia a produção de biogás?”).
- Metodologias Ativas complementares: Sala de Aula Invertida, Gamificação e *Peer Instruction*, incentivando estudo prévio, engajamento e aprendizagem colaborativa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo principal desenvolver e apresentar uma proposta didática interdisciplinar para o Ensino Médio, utilizando a análise comparativa entre dois biodigestores – um com controle automatizado de temperatura e outro sem – como recurso pedagógico. A pesquisa buscou contextualizar conceitos das áreas de química, biologia, física e matemática por meio da temática da digestão anaeróbia e da produção de energia renovável.

Os resultados obtidos com a construção e monitoramento dos biodigestores, bem como o desenvolvimento do sistema de controle de temperatura com Arduino, demonstraram o potencial prático e didático da abordagem. A comparação entre os biodigestores permitiu observar a influência da temperatura na produção de biogás, evidenciando a importância do controle térmico para otimizar o processo. Embora o experimento não tenha sido aplicado diretamente com os alunos, os dados gerados e a experiência de desenvolvimento do protótipo fornecem um material rico para a criação de atividades pedagógicas.

A proposta didática elaborada, detalhada nas seções anteriores, integra os conhecimentos científicos e tecnológicos de forma contextualizada, alinhando-se às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) e promovendo uma educação mais conectada com o mundo real. A utilização de metodologias ativas, como a Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP) e o Ensino por Investigação, foi destacada como fundamental para engajar os estudantes e torná-los protagonistas do processo de ensino-aprendizagem.

As conexões interdisciplinares exploradas – abrangendo química (reações bioquímicas, composição do biogás), física (termodinâmica, medição de volume, eletrônica), biologia (microbiologia, ciclos biogeoquímicos, sustentabilidade) e matemática (análise de dados, modelagem, cálculos de proporção) – reforçam a riqueza do tema para uma abordagem integrada no Ensino Médio. O uso do Arduino, em particular, mostrou-se uma ferramenta valiosa para o desenvolvimento de habilidades em programação, raciocínio lógico e automação.

Como limitações do estudo, destaca-se a não aplicação direta da proposta didática em ambiente escolar com os alunos, o que impediu a coleta de dados sobre o impacto direto na aprendizagem e no engajamento dos estudantes. Futuras pesquisas poderiam focar na implementação e avaliação dessa proposta em sala de aula, com a participação ativa dos alunos, para validar sua eficácia pedagógica e identificar possíveis aprimoramentos.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a expansão do projeto para incluir o monitoramento de outras variáveis importantes na biodigestão, como pH e pressão, além da otimização do sistema de controle para diferentes tipos de substratos. A criação de módulos

didáticos mais específicos e a formação continuada de professores para a aplicação dessas metodologias também seriam contribuições valiosas para a área. Em suma, este trabalho oferece um ponto de partida sólido para a integração de ciência, tecnologia e sustentabilidade no ensino, preparando os jovens para os desafios do século XXI.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. E. D. **Importância do pH no equilíbrio químico de biodigestores anaeróbios**. 2020. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/55544/3/2020_tcc_cedalmeida.pdf>. Acesso em: 13 ago 2025.
- ANDRADE, J. C. S. et al. Aprendizagem baseada em projetos aplicada ao ensino de programação: revisão sistemática de literatura. **Terrae Didactica**, Campinas, SP, v. 19, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/377130188_Aprendizagem_baseada_em_projetos_aplicada_ao_ensino_de_programacao_revisao_sistematica_de_literatura>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- APARECIDO, G. P. et al. Sistema de monitoramento: biodigestor. **RevistaFT**, v. 28, ed. 138, 2024. DOI: 10.69849/revistaft/ma10202409301003.
- ARAUJO, M. L. **Influência dos ácidos voláteis na geração de biogás**. 2022. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Processos Químicos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/30405/1/acidosvolateisgeracaobiogas.pdf>>. Acesso em: 11 ago 2025.
- ARBOIT, N. K. S. et al. Potencialidade de utilização da Energia Geotérmica no Brasil – Uma Revisão de Literatura. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, Brasil, v. 26, p. 155–168, 2013. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2013.0026.0008>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- ARDUINO. **What is Arduino?**. 2024. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- BASTOS, J. A. et al. Digestão anaeróbia de efluente de codornas: efeitos da diluição e relação inóculo/substrato na produção de biogás. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. e11595, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n3e11595>. Acesso em: 14 jul. 2025.
- BIOGASEENERGIA. **Biodigestores transformando o Ensino**. 2024. Disponível em: <<https://biogaseenergia.com.br/biodigestores-transformando-o-ensino>>. Acesso em: 5 jul. 2025.
- BRASIL. **Câmara dos Deputados. Projeto de Lei nº 10370, de 2018. Institui a Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica-PRONASOLAR e dá outras providências**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2018. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1669732&filename=Avulso%20PL%2010370/2018>. Acesso em: 03 jan. 2025.
- BRASIL. **Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Educação é a base**. Brasília, DF: MEC, 2018. Disponível em: <https://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_-versaofinal_site.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- BRASIL. **Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. Resolução CNE/CEB nº 3, de 21 de novembro de 2018. Define as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**.

Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 nov. 2018. Disponível em: <https://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=102481-rceb003-18&category_slug=novembro-2018-pdf&Itemid=30192>. Acesso em: 17 ago. 2025.

CAMPOS, J. **Abordagem STEM: O desafio do planejamento e implementação na educação profissional de ensino médio**. 2020. 144f. Dissertação (Mestrado em Ensino) — Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2020.

CARTAXO, A. S. B. et al. Biodigestor caseiro como ferramenta metodológica para o ensino de educação ambiental nas escolas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 214-230, 2020. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e22020214-230>.

CASTRO, R. M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução à Energia Eólica**. Lisboa: Portugal: Universidade Técnica de Lisboa, ed. 4, 2009. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/read/27652584/introducao-a-energia-eolica-rui-mg-castro>>. Acesso em: 14 jun. 2024.

CBIE. **O que são Hidroelétricas Reversíveis?**. CBIE, 8 de maio de 2020. Disponível em: <<https://cbie.com.br/o-que-sao-hidroeletricas-reversiveis/>>. Acesso em: 28 dez. 2024.

CORRÊA, A. G. et al. **Influência da temperatura na produção de biogás através da codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos alimentares e industriais**. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, III, 2020, Gramado.

DIAS, C. C.; FRANCO, M. E. **Oficina de Arduino como ferramenta interdisciplinar**. In: JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA E SIMPÓSIO DA PÓS-GRADUAÇÃO DO IFSULDEMINAS, 10., 2017, Machado. **Anais [...]**. Machado: IFSULDEMINAS, 2017. p. 1-4. Disponível em: <<https://memoriajornada.ifsuldeminas.edu.br/index.php/jcmuz2/jcmuz2/paper/viewFile/4180/3046>>. Acesso em: 8 jul 2025.

DUPONT, G. K. et al. Estudo dos efeitos da temperatura e diluição dos dejetos de suínos na geração de biogás. **Revista Interdisciplinar de Resíduos Sólidos**, v. 1, n. 1, p. 149-160, 2020. Disponível em: <<https://institutoventuri.org/ojs/index.php/FIRS/article/view/149>>. Acesso em: 13 jul. 2025.

EDUCACIONAL. **Aprendizagem baseada em projetos: como aplicar a metodologia**. 2024. Disponível em: <<https://educacional.com.br/praticas-pedagogicas/aprendizagem-baseada-em-projetos/>>. Acesso em: 03 ago. 2025.

EDUCAMUNDO. **Guia completo sobre Planejamento de Aula e Interdisciplinaridade**. 2025. Disponível em: <<https://educamundo.com.br/blog/guia-completo-planejamento-aula-interdisciplinaridade/>>. Acesso em: 13 ago. 2025.

EMBRAPA. **Digestão anaeróbia de efluentes da suinocultura - Gestão e tratamento dos dejetos na suinocultura**. v. 3, c. 4, p. 61-80. 2024. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1168356/1/final10405-Digestao-anaerobia-de-efluentes-da-suinocultura.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2025.

EMBRAPA. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. ISSN 0101-6245. Junho, 2006. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/856124/1/doc115.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

EMBRAPA. **Recomendação da dose e distribuição do biofertilizante de suíno**. 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/biogasfert/fertilizantes/recomendacao-da-dose-e-distribuicao-do-biofertilizante-de-suino>. Acesso em: 26 jul. 2025.

EMERSON, R. W. ANOVA Assumptions. **Journal of Visual Impairment & Blindness**, v. 116, n. 5, p. 387–388, 2022. DOI: <<https://doi.org/10.1177/0145482X221124187>>. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0145482X221124187>>. Acesso em: 17 set. 2025.

ENGENHARIA 360. **O que são usinas hidrelétricas reversíveis?**. Engenharia 360, 2023. Disponível em: <<https://engenharia360.com/5-tiposde-estacas-na-construcao-civil/>>. Acesso em: 28 dez. 2024.

ESTEVES, R. C. **Avaliação de Biodigestores em Escala de Bancada para Geração de Biogás de Resíduos Orgânicos**. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. **Arduino em ação**. Novatec Editora, 2013. ISBN: 978-85-7522-373-4. Disponível em: <<https://s3.novatec.com.br/capitulos/capitulo-9788575223734.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2024.

FAPEAM. **Bactéria antecipa mudança para se adaptar**. 2008. Disponível em: <<https://www.fapeam.am.gov.br/bacteria-antecipa-mudanca-para-se-adaptar/>>. Acesso em: 3 ago 2025.

FASOLIN, J. P. et al. **Influência da temperatura no desenvolvimento de bactérias biocontroladoras e na produção de compostos antimicrobianos**. In. ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO - Universidade Federal de Pelotas, 2016. Disponível em: <https://cti.ufpel.edu.br/siepe/arquivos/2016/CA_03706.pdf>. Acesso em: 27 jul 2025.

FERNANDES, J. P. A. **Instrumentação eletrônica com materiais alternativos para aulas experimentais de química: Uma revisão integrativa**. 2020. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. São Paulo: Paz e Terra, 1996. Disponível em: <<https://nepegeo.paginas.ufsc.br/files/2018/11/Pedagogia-da-Autonomia-Paulo-Freire.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2025.

FREITAS, F. F.; FURTADO, A. C.; CUEVAS, A. L. Y. Construção de um biodigestor didático para a estação Ciências do Parque Tecnológico de Itaipú. **Revista Brasileira de Extensão Universitária**, v. 9, n. 2, p. 65-74, 2018.

GADOTTI, M. **História das ideias pedagógicas**. São Paulo: Editora Ática, 2003. Disponível em: <<https://acervo.paulofreire.org/bitstreams/b3c7ce27-9170-4aa6-bcbc-74456e3965e6/download>>. Acesso em: 2 out. 2025.

GEF BIOGÁS BRASIL. **Influência da temperatura na viabilidade de um biodigestor alimentado com cama de frango: nota técnica**. Brasília: MCTI, 2021. E-book. Disponível em: <[https://abiogas.com.br/wp-content/uploads/protectedfiles/Influ%C3%Aancia%20da%20temperatura%20na%20viabilidade%20de%20um%20biodigestor%20alimentado%20com%20cama%20de%20frango%20\(2020\).pdf](https://abiogas.com.br/wp-content/uploads/protectedfiles/Influ%C3%Aancia%20da%20temperatura%20na%20viabilidade%20de%20um%20biodigestor%20alimentado%20com%20cama%20de%20frango%20(2020).pdf)>. Acesso em: 28 jun. 2025.

GIRARDI NETO, J. et al. Quantificação de biogás em reatores anaeróbios através do método de deslocamento de volume de água. **Revista de estudos ambientais (Online)**, v.16, n. 1, p.45-53,

jan./jun. 2014. ISSN 1983 1501.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Global Wind Report 2024**. Disponível em: <<https://gwec.net/global-wind-report-2024/>>. Acesso em: 10 out. 2024.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista Usp**, n. 72, p. 6-15, 2007. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i72p6-15>. Acesso em: 28 jun. 2024.

GONÇALVES, M. N. **Os Efeitos da Temperatura na Produção de Biogás em Biodigestores**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1165>. Acesso em: 28 jun. 2024.

GOVERNO DO BRASIL. **ESCOLAS +VERDES - Biodigestores**. 2-22. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/mma-lanca-escolas-verdes-para-estimular-acoes-sustentaveis-na-educacao/EscolasVerdeseBiogestores.pdf>>. Acesso em: 7 ago. 2025.

GUIMARÃES, C. S; MAIA, D. R. S. Desenvolvimento de biodigestores anaeróbios com sistema de controle e automação para a produção de biogás utilizando resíduo alimentar e esgoto. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v. 6, n. 3, p. 12254-12269 mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-185>.

HASAN, C. et al. Produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais: análise dos teores de sólidos totais, voláteis e fixos em amostras pré e pós digestão anaeróbia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [S. l.], v. 8, n. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5380/rber.v8i1.56321>. Acesso em: 14 jul. 2025.

INSTITUTO ALGAR. **A importância da educação para o desenvolvimento social**, 2025. Disponível em: <<https://www.institutoalgar.org.br/educacao-desenvolvimento-social/>>. Acesso em: 3 out. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2022: Analysis and Forecast to 2027**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2022>>. Acesso em: 14 jan 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable energy highlights: 11 July 2024**. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/Renewable_energy_highlights_FINAL_July_2024.pdf>. Acesso em: 14 out. 2024.

JERANOSKI, L. P. de C. **Desenvolvimento de currículo STEM para educação de eletrônica e robótica no ensino secundário**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança. 2023. Disponível em: <<https://www.proquest.com/openview/b8dedc5eb68bc3a12c6a07f737829661/1?pqorigsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>>. Acesso em: 2 ago. 2025.

KARLSSON, T. et al. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Ed. da Univates, 2014.

KENNY, D. A.; JUDD, C. M. Consequences of violating the independence assumption in analysis of variance. **Psychological Bulletin**, v. 99, n. 3, p. 422–431, 1986. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/232549408_Consequences_of_Violating_the_Independence_Assumption_in_Analysis_of_Variance>. Acesso em: 20 set. 2025.

- KIM, T. K. Understanding one-way ANOVA using conceptual figures. **Korean Journal of Anesthesiology**, v. 70, n. 1, p. 22–30, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4097/kjae.2017.70.1.22>. Disponível em: <<https://ekja.org/journal/view.php?doi=10.4097/kjae.2017.70.1.22>>. Acesso em: 15 set. 2025.
- KRETZER, S. G. et al. Educação ambiental em gestão de resíduos e uso de biodigestor em escola pública de Florianópolis. **Revista Eletrônica de Extensão**, Florianópolis, v. 12, n. 19, p.2-15, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5007/1807-0221.2015v12n19p2>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, ed.2, p.214, 2022. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1141618>>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- LAERD STATISTICS. **Understanding a repeated measures ANOVA**. [S. l.], [s. d.], 2018. Disponível em: <<https://statistics.laerd.com/statistical-guides/repeated-measures-anova-statistical-guide.php>>. Acesso em: 1 out. 2025.
- LEVENE, H. **Robust tests for equality of variances**. In: OLKIN, I. (Ed.). CONTRIBUTIONS TO PROBABILITY AND STATISTICS. Stanford: Stanford University Press, 1960. p. 278–292. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/24137168_Robust_tests_for_the_equality_of_variances>. Acesso em: 11 set. 2025.
- LIMA, C. B. et al. Uso de biodigestor didático e técnica de animação para ensino de Química aos educandos indígenas. **Revista Educação Pública**, v. 21, nº 1, 12 de janeiro de 2021. Disponível em: <<https://educacaopublica.cecierj.edu.br/artigos/21/1/uso-de-biodigestor-didatico-e-tecnica-de-animacao-para-ensino-de-quimica-aos-educandos-indigenas>>. Acesso em: 14 out. 2024.
- LIMA JUNIOR, J. G. S. et al. Atividades experimentais com arduino abordando fundamentos da cinemática, termometria e eletrodinâmica na escola estadual de ensino médio Dr. Gabriel Sales Pimenta em Marabá (PA). **Scientia Plena**. v. 15, n. 7, 2019.
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, n. 1, p. 50–60, 1947. DOI: <<https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>>. Disponível em: <<https://projecteuclid.org/journals/annals-of-mathematical-statistics/volume-18/issue-1/On-a-Test-of-Whether-one-of-Two-Random-Variables/10.1214/aoms/1177730491.full>>. Acesso em: 11 set. 2025.
- MAPA. **Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2025.
- MARAFON, A.C. et al. **Uso da biomassa para a geração de energia**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016. 28 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1953; 211).
- MARCUCCI, L. W. **Otimização da produção de biogás em biodigestores batelada**. 2018. 65f Dissertação (Mestrado em Biometria) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/8fce4fb7->

6fcc-42c9-a157-3e10afcd36d4/content>. Acesso em 11 de ago 2025.

MARTINS, N. F. et al. Atividades de Arduino no processo de ensino e aprendizagem nas aulas de ciências. **Revista Educação & Tecnologia**. Curitiba, n. 22, p. 64-81, 2022.

MATSUDA, G. et al. **Biodigestor caseiro: promovendo educação ambiental através da participação dos alunos**. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 7., 2024, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: IBEAS, 2024. p. 1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.7.24.III-011>. Acesso em: 5 jul. 2025.

MELLO, S. C. **Tratamento Anaeróbico de Resíduos Alimentares para Produção Descentralizada de Biogás: Contribuições ao ODS 7 da ONU. 2023**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

MEYER, B. E.; RIBEIRO, J. E.; POMBO, V. **Análise de viabilidade técnica de um sistema de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de dejetos suínos**. 2017. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Celeiro das Renováveis: Relatório da AIE Reforça o Protagonismo do Brasil no Cenário Internacional**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/relatorio-da-aie-reforca-o-protagonismo-do-brasil-no-cenario-internacional>>. Acesso em: 17 jul. 2024.

MIRANDA, A. P.; AMARAL, L. A.; LUCAS JR., J. **Influência da temperatura na biodigestão anaeróbia de dejetos bovinos e suínos**. In. ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, X e VI, 2006, São José dos Campos.

MONTEIRO, J. A. et al. Arduino no Ensino de Física: uma Revisão Sistemática de Literatura de 2011 a 2021. **Amazônia | Revista de Educação em Ciências e Matemática**, v. 18, n. 40, p. 177-190, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18542/amazrecm.v18i40.12175>.

MOREIRA, M. P. C.; ROMEU, M. C.; ALVES, F. R. V. Contribuições do Arduino no ensino de Física: uma revisão sistemática de publicações na área do ensino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 801-824, 2018. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6816391>>. Acesso em: 7 ago. 2025.

MUHAMMAD, L. N. Guidelines for repeated measures statistical analysis. **Journal of Clinical and Translational Research**, v. 9, n. 2, p. 195–202, 2023. Disponível em: <<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10231988/>>. Acesso em: 1 out. 2025.

NIERADKA, I. P. **Estudo sobre produção de biogás a partir dos dejetos de um módulo de aquaponia e automação do biodigestor**. 2023. 90f. Tese (Doutorado em Energia e Sustentabilidade) — Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu. 2023.

NIST/SEMATECH. **e-Handbook of Statistical Methods – Levene Test for Equality of Variances**. [S. l.], [s. d.], 2021. Disponível em: <<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35a.htm>>. Acesso em: 18 set. 2025.

NOVA ESCOLA. **Áreas do conhecimento: os desafios da interdisciplinaridade no Novo Ensino Médio**. 2022. Disponível em: <<https://novaescola.org.br/conteudo/21243/areas-do-conhecimento-os-desafios-da-interdisciplinaridade-no-novo-ensino-medio>>. Acesso em: 17 ago. 2025.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA (OC). **Futuro da Energia: Visão do Observatório do Clima para uma Transição Justa no Brasil**. 2024. Disponível em: <<https://energiaambiente.org.br/produto/futuro-da-energia>>. Acesso em: 3 dez. 2024.

OKAMURA, L. A. **Avaliação e melhoria do poder calorífico de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

OLIVEIRA, H. G. et al. Energia, Sociedade e Meio Ambiente no Desenvolvimento de Um Biodigestor: a Interdisciplinaridade e a Tecnologia Arduino para Atividades Investigativas. **Química nova na escola**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 144-152, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0104-8899.20160127>. Acesso em: 10 out. 2024.

ONODY, R. N. **Uma Usina Geotérmica no Brasil?**. Instituto de Física de São Carlos, 2022. Disponível em: <[ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>. Acesso em: 28 jun. 2024.](https://www2.ifsc.usp.br/portal-ifsc/uma-usina-geotermica-no-brasil-artigo-assinado-pelo-prof-roberto-n-onody/#:~:text=No%20mundo%2C%20a%20energia%20geot%C3%A9rmica,para%20banhos%20termais%20e%20recrea%C3%A7%C3%A3o.>>. Acesso em: 10 out. 2024.</p></div><div data-bbox=)

ORRICO JÚNIOR, M. A. P. et al. Avaliação de parâmetros da biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos alimentados com dietas à base de milho e sorgo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, p. 600-607, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/eagri/a/5CZc5y5VtbGFw9mFVXZ8jJb/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 14 jul. 2025.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.3, p.474-482, jul./set. 2009. Disponível em: <<https://scispace.com/pdf/biodigestao-anaerobia-de-dejetos-de-suinos-com-e-sem-2kryl710dv.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2025.

PAIVA, E. D. A simplified description of bodies floating in the water. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, p. e20190066, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0066>.

PEREIRA, J. A. **Um recurso didático para o ensino de energia baseado na plataforma Arduino**. 2018. 148f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciência e Tecnologia) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

PINTO, R. O. **Avaliação da digestão anaeróbia na bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos, lodos de tanques sépticos, dejetos suínos e lixiviado**. 2006. 233f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/89180>. Acesso em: 13 ago. 2025.

PRINCIVAL, G. C. **Desenvolvimento de um sistema computacional de monitoramento da produção do biogás por meio de sensores eletrônicos e Arduino**. 2016. 79f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2016.

QUEIROZ, R. et al. Production of electrical power through hydraulic energy and its environmental impacts. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S. l.], v. 13, n. 13,

p. 2774–2784, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5902/223611709124>. Acesso em: 13 set. 2024.

RAMALHO, D. A. S; OLIVEIRA, G. A; MIRANDA, P. P. C. **Tipos de Energias Renováveis e Não Renováveis**. 2022. 53f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel Engenharia de Produção) – Centro Universitário de Barra Mansa. Barra Mansa, RJ, 2022.

RAMOS, A. D. et al. Uso da plataforma ARDUINO na interdisciplinaridade do Ensino Fundamental I: Relato extensionista em uma escola pública. **Revista Extensão em Foco**, n. 17, p. 120-132, 2018.

REBOLLAR, P. B. M.; RODRIGUES, P. R. **Energias Renováveis: Energia Solar**. Edição – Livro Digital. 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Youssef-Youssef/publication/259868130_Energia_Solar/links/00b4952e3e2a7933af000000/Energia-Solar.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2024.

ROMEU, E. O. C. et al. Atividade lipolítica in vitro de actinobactérias em gradiente de pH, salinidade e temperatura. **Enciclopédia Biosfera - Centro Científico Conhecer**, 2021, Jandaia-
GO, v.18 n.38; p. 115, 2021. Disponível em:<https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Cavalcante-4/publication/357432252_ATIVIDADE_LIPOLITICA_IN_VITRO_DE_ACTINOBACTERIAS_EM_GRADIENTE_DE_PH_SALINIDADE_E_TEMPERATURA/links/638f777311e9f00cda21d218/ATIVIDADE-LIPOLITICA-IN-VITRO-DE-ACTINOBACTERIAS-EM-GRADIENTE-DE-PH-SALINIDADE-E-TEMPERATURA.pdf>. Acesso em: 2 ago 2025.

SAE Digital. **Arquivos Interdisciplinaridade na BNCC**. 2025. Disponível em: <<https://sae.digital/tag/interdisciplinaridade-na-bncc/>>. Acesso em: 18 ago. 2025.

SANTOS, G. A. A.; NADALETI, W. C. **Utilização de biodigestores sob a ótica da economia circular**. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, XXIX, 2020, Pelotas. Disponível em: <https://cti.ufpel.edu.br/siepe/arquivos/2020/EN_02292.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2024.

SANTOS, S. M. A. V. Metodologias ativas e cultura maker no ensino médio: explorando o potencial do arduino para uma aprendizagem significativa. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], p. 19–93, 2025. Disponível em: <<https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/18584>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SAVIANI, D. Ciência e educação na sociedade contemporânea: desafios a partir da pedagogia histórico-crítica. **Revista Faz Ciência**, v. 13, n. 18, p. 55–70, 2000. DOI: <<https://doi.org/10.48075/rfc.v12i16.7434>>. Disponível em: <<https://saber.unioeste.br/index.php/fazciencia/article/view/7434>>. Acesso em: 2 out. 2025.

SCARPARI, D. O. **Física dos biodigestores: contextualizando o ensino de física para alunos do curso técnico agrícola**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SCHERER, T. E. **A Importância da Educação Ambiental no Contexto Escolar**. Brasil Escola. 2019. Disponível em: <<https://meuartigo.brasilecola.uol.com.br/educacao/a-importancia-da-educacao-ambiental-no-contexto-escolar.htm>>. Acesso em: 11 jul. 2024.

SCIPY. **scipy.stats.shapiro. SciPy v1.16.2 Manual**. [S. l.], [s. d.], 2008. Disponível em: <<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.shapiro.html>>. Acesso em: 11 set. 2025.

SEBRAE. **Saiba como é produzida a energia a partir da biomassa**. 2022. Disponível em: <[SELTMAN, H. J. **Experimental Design and Analysis**. July 11, 2018. Disponível em: <<https://www.stat.cmu.edu/~hseltman/309/Book/Book.pdf>>. Acesso em: 28 jul. 2025.](https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/saiba-como-e-produzida-a-energia-a-partir-da-biomassa,10e33ae7b9584810VgnVCM100000d701210aRCRD#:~:text=Transforma%C3%A7%C3%A3o%20da%20biomassa%20em%20energia,metanol%2C%20biodiesel%20e%20biog%C3%A1s).>. Acesso em: 09 out 2024.</p></div><div data-bbox=)

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965. DOI: <<https://doi.org/10.2307/2333709>>. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2333709>>. Acesso em: 17 set. 2025.

SHUBEITA, F. M. **Análise e Modelagem de Sistema de Digestão Anaeróbica Monitorado para Previsão e Busca de Eficiência de Operação**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/7099>>. Acesso em: 29 dez. 2024.

SILVA, C. K. F. **O papel da educação na formação do sujeito em uma sociedade contemporânea**. In: CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO. **Anais [...]** CONEDU, v. 4, 2017. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conedu/2017/TRABALHO_EV073_MD1_SA5_ID9579_12102017145035.pdf>. Acesso em: 1 out. 2025.

SILVA JUNIOR, J. F. **Relato de experiência de estágio: Um estudo sobre o uso do arduino no ensino fundamental e médio**. 2024. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Computação e Informática) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2024. Disponível em: <<https://repositorio.ifpb.edu.br/bitstream/177683/3923/1/TCC%20Jos%C3%A9%20F%C3%A9lix%20da%20Silva%20J%C3%BAnior.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

SIMON, F. W. **Valorização do digestato proveniente da digestão anaeróbia de resíduos alimentares como biofertilizante**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/216032/PGEA0673-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 out. 2025.

SINGH, R.; ANAND, R. C. Comparative performances of Indian small solid-state and conventional anaerobic digesters. **Bioresource Technology**, v. 47, n. 3, p. 235-238, 1994. DOI: <[https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90186-4](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90186-4)>.

SOETHE, G. C. **Aproveitamento da massa visceral da tilápia (*Oreochromis niloticus*) para produção de biogás**. 2014. 73f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

SOUZA, A. C. V. et al. Desenvolvimento de incubadora de baixo custo com sistema de controle de temperatura para testes de potencial de produção de biogás. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia da FAEF**, XXI, v. 37, n. 1, 2020.

SOUZA, C. F. et al. Caracterização de dejetos de suínos em fase de terminação. **Revista Ceres**, vol. 56, núm. 2, 2009, pp. 128-133. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/3052/305226730003.pdf>>. Acesso em: 9 jul. 2025.

SOUZA, C. F.; LUCAS JÚNIOR, J.; FERREIRA, W. P. M. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato: considerações sobre a partida. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 437-446, 2005. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/eagri/a/LGWJCnzqNdm9NdBGRJf3V4y/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 10 jul. 2025.

TAVARES, S. G. et al. Influência das variações térmicas e climáticas na produção de biogás. **Nativa**, v. 4, n. 5, p. 287-295, set./out. 2016. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/download/3219/pdf/13002>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

TIETZ, C. M. et al. Produção de biogás a partir de dejetos suínos. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.3, n.3, p. 92-102, 2014. ISSN: 2316-4093.

VIEIRA, H. G.; POLLI, H. Q. O biogás como fonte alternativa de energia. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaritinga, SP, v. 17, n. 1, p. 388-400, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31510/inf.v17i1.766>. Acesso em: 7 abril. 2025.

WORLD ECONOMIC FORUM (WEF). **Fostering effective energy transition: insight report**. Geneva: World Economic Forum, 2024. Disponível em: <<https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition-2024>>. Acesso em: 3 dez. 2024.

ANEXOS

ANEXO A – MONITORAMENTO E CONTROLE TÉRMICO DO BIODIGESTOR

```

1  #include <ElcerezThermistor_NTC.h>
2  #include <Wire.h>
3  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4
5  Thermistor_NTC temp(A1);
6  LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
7
8  // Configurações ajustáveis
9  int tempMin = 37; // Liga o relé quando temperatura < tempMin
10 int tempMax = 40; // Desliga o relé quando temperatura >= tempMax
11 const int relePin = 7;
12 bool emCalibracao = false;
13 bool releLigado = false;
14
15 void setup() {
16   Serial.begin(9600);
17   pinMode(relePin, OUTPUT);
18   digitalWrite(relePin, LOW);
19
20   lcd.init();
21   lcd.backlight();
22   lcd.setCursor(0, 0);
23   lcd.print("Iniciando...");
24   delay(1000);
25 }
26
27 void loop() {
28   static unsigned long ultimoEnvio = 0;
29   float temperatura = temp.getTempC();
30
31   // Controle do Relé
32   if (!emCalibracao) {
33     if (temperatura >= tempMax && releLigado) {
34       digitalWrite(relePin, LOW);
35       releLigado = false;
36     }
37     else if (temperatura < tempMin && !releLigado) {
38       digitalWrite(relePin, HIGH);
39       releLigado = true;
40     }
41   }
42
43   // Atualização do LCD (1x por segundo)
44   static unsigned long ultimaAtualizacaoLCD = 0;
45   if (millis() - ultimaAtualizacaoLCD >= 1000) {
46     ultimaAtualizacaoLCD = millis();
47
48     lcd.clear();
49     lcd.setCursor(0, 0);
50     lcd.print("Temp: ");
51     lcd.print(temperatura, 1);
52     lcd.print("C");
53
54     lcd.setCursor(0, 1);
55     if (emCalibracao) {
56       lcd.print("CALIBRANDO...");
57     } else {
58       lcd.print(releLigado ? "AQUECENDO " : "ESFRIANDO ");
59     }
60   }
61
62   // Comunicação Serial Melhorada
63   if (Serial.available() > 0) {
64     String comando = Serial.readStringUntil('\n');
65     comando.trim();
66
67     if (comando == "GET_DATA") {
68       Serial.print("BIO:");
69       Serial.println(temperatura, 1);
70     }
71     else if (comando == "CALIBRAR" && !emCalibracao) {
72       emCalibracao = true;
73       unsigned long inicio = millis();
74       while (millis() - inicio < 10000) {
75         lcd.clear();
76         lcd.setCursor(0, 0);
77         lcd.print("Calibrando...");
78         lcd.setCursor(0, 1);
79         lcd.print(((10000 - (millis() - inicio)) / 1000);
80         lcd.print("s restantes");
81         delay(300);
82       }
83       emCalibracao = false;
84       lcd.clear();
85       lcd.print("Calibrado!");
86       delay(1000);
87     }
88     else if (comando.startsWith("LIMITES:")) {
89       int sep = comando.indexOf(',');
90       tempMin = comando.substring(8, sep).toInt();
91       tempMax = comando.substring(sep + 1).toInt();
92       lcd.clear();
93       lcd.print("Novos Limites:");
94       lcd.setCursor(0, 1);
95       lcd.print(tempMin);
96       lcd.print("-");
97       lcd.print(tempMax);
98       lcd.print("C");
99       delay(2000);
100    }
101  }
102
103  delay(50);
104 }

```

ANEXO B – MONITORAMENTO DA TEMPERATURA AMBIENTE

```
1  #include <Elcereza_Thermistor_NTC.h>
2  #include <Wire.h>
3  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4
5  Thermistor_NTC temp(A1);
6  LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
7
8  void setup() {
9      Serial.begin(9600);
10     lcd.init();
11     lcd.backlight();
12     lcd.setCursor(0, 0);
13     lcd.print("Iniciando...");
14     delay(1000);
15 }
16
17 void loop() {
18     float temperatura = temp.getTempC();
19
20     // Atualização do LCD (1x por segundo)
21     static unsigned long ultimaAtualizacao = 0;
22     if (millis() - ultimaAtualizacao >= 1000) {
23         ultimaAtualizacao = millis();
24
25         lcd.clear();
26         lcd.setCursor(0, 0);
27         lcd.print("Temp Ambiente:");
28         lcd.setCursor(0, 1);
29         lcd.print(temperatura, 1);
30         lcd.print(" C");
31     }
32
33     // Comunicação Serial
34     if (Serial.available() > 0) {
35         String comando = Serial.readStringUntil('\n');
36         if (comando == "GET_DATA") {
37             Serial.print("AMB:");
38             Serial.println(temperatura, 1);
39         }
40     }
41
42     delay(50);
43 }
```

ANEXO C – INTEGRAÇÃO E REGISTRO DE DADOS EM NUVEM VIA SCRIPT PYTHON

```

import serial
import gspread
from datetime import datetime
import time
import csv
import os
from google.auth.exceptions import TransportError

# Configurações
PORTAS = {
    "Biodigestor": "COM3",
    "Ambiente": "COM4"
}
CREDS_FILE = "credenciais.json"
BACKUP_FILE = "backup_dados.csv"
HORARIOS_ENVIO = [4, 10, 16, 22]

def conectar_google_sheets():
    try:
        gc = gspread.service_account(CREDS_FILE)
        return gc
    except Exception as e:
        print(f" Erro no Google Sheets: {str(e)[:50]}...")
        return None

def salvar_local(timestamp, dispositivo, temperatura):
    with open(BACKUP_FILE, 'a', newline='') as f:
        csv.writer(f).writerow([timestamp, dispositivo, temperatura])

def enviar_para_nuvem(gc, timestamp, dispositivo, temperatura):
    try:
        planilha = gc.open(f"Dados_{dispositivo}").sheet1
        planilha.append_row([timestamp, temperatura])
        return True
    except Exception as e:
        print(f" Falha no envio {dispositivo}: {str(e)[:50]}...")
        return False

def ler_dados_arduino(serial_port, dispositivo):
    try:
        serial_port.reset_input_buffer()
        serial_port.write(b'GET_DATA\n')
        time.sleep(0.5)
        linha = serial_port.readline().decode().strip()

        if dispositivo == "Biodigestor" and linha.startswith("BIO:"):
            return float(linha[4:])
        elif dispositivo == "Ambiente" and linha.startswith("AMB:"):
            return float(linha[4:])
        return None
    except Exception as e:
        print(f" Erro na leitura do {dispositivo}: {str(e)[:50]}...")
        return None

def main():
    if not os.path.exists(BACKUP_FILE):
        with open(BACKUP_FILE, 'w', newline='') as f:
            csv.writer(f).writerow(["Timestamp", "Dispositivo", "Temperatura"])

    gc = conectar_google_sheets()

    try:
        ard_bio = serial.Serial(PORTAS["Biodigestor"], 9600, timeout=2)
        ard_amb = serial.Serial(PORTAS["Ambiente"], 9600, timeout=2)
        time.sleep(2)

        print("\n Sistema Iniciado")
        print(f" Leituras horárias")
        print(f" Envios para a Nuvem: {' '.join(map(str, HORARIOS_ENVIO))}h\n")

        ultima_hora_processada = None

        while True:
            agora = datetime.now()
            hora_atual = agora.hour

            # Processa apenas no primeiro minuto 00 de cada hora
            if agora.minute == 0 and hora_atual != ultima_hora_processada:
                timestamp = agora.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
                hora_formatada = agora.strftime("%H:%M")
                envio_requerido = hora_atual in HORARIOS_ENVIO
                ultima_hora_processada = hora_atual

                # Processa Biodigestor
                temp_bio = ler_dados_arduino(ard_bio, "Biodigestor")
                if temp_bio is not None:
                    salvar_local(timestamp, "Biodigestor", temp_bio)
                    print(f"[Biodigestor] {temp_bio:.1f}°C às {hora_formatada}")
                    if envio_requerido and gc:
                        if enviar_para_nuvem(gc, timestamp, "Biodigestor", temp_bio):
                            print(f" Biodigestor enviado: {temp_bio:.1f}°C")

                # Processa Ambiente
                temp_amb = ler_dados_arduino(ard_amb, "Ambiente")
                if temp_amb is not None:
                    salvar_local(timestamp, "Ambiente", temp_amb)
                    print(f"[Ambiente] {temp_amb:.1f}°C às {hora_formatada}")
                    if envio_requerido and gc:
                        if enviar_para_nuvem(gc, timestamp, "Ambiente", temp_amb):
                            print(f" Ambiente enviado: {temp_amb:.1f}°C")

                # Espera até o próximo minuto para evitar repetições
                time.sleep(55)

```