

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA E AMBIENTE

ANDRÉ LUIS GOMES DE SOUSA

**PROTÓTIPO PARA MONITORAMENTO DE UM DE BIODIGESTOR E DE UM
GASÔMETRO EXPERIMENTAL UTILIZANDO CONTROLADOR, INTERFACE
WEB E MÓDULOS SENSORES**

São Luís – MA

2025

ANDRÉ LUIS GOMES DE SOUSA

**PROTÓTIPO PARA MONITORAMENTO DE UM BIODIGESTOR E DE UM
GASÔMETRO EXPERIMENTAL UTILIZANDO CONTROLADOR, INTERFACE
WEB E MÓDULOS SENSORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do grau de Mestre em Energia e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Jocélio dos Santos Araújo

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a). Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Sousa, André Luis Gomes de.

Protótipo para monitoramento de um biodigestor e de um gasômetro experimental utilizando controlador, interface web e módulos sensores / André Luis Gomes de Sousa. 2025.

95 p.

Coorientador(a) 1: Francisco Borges Carreiro.

Orientador(a): Jocélio dos Santos Araújo.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

1. Biogás. 2. Energias Renováveis. 3. Indústria 4.0.

4. Indústria 5.0. 5. Interação Homem-máquina. I.

Araújo, Jocelio dos Santos. II. Carreiro, Francisco

Borges. III. Título.

ANDRÉ LUIS GOMES DE SOUSA

**PROTÓTIPO PARA MONITORAMENTO DE UM DE BIODIGESTOR E DE UM
GASÔMETRO EXPERIMENTAL UTILIZANDO CONTROLADOR, INTERFACE
WEB E MÓDULOS SENSORES**

Aprovado em 27/06/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jocélio dos Santos Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Prof. Dr^a. Danúbia Soares Pires
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA)

Prof. Dr. Jorge Bertoldo Junior
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

“O futuro dependerá daquilo que fazemos no presente.”

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, Ele que sempre esteve comigo a todo instante, que sempre me amparou em todos os momentos, me provendo de força, perseverança e sabedoria para que eu pudesse concluir esse projeto.

Agradeço com muito amor à minha esposa Elane, pelo apoio e incentivo constantes em todos os momentos dessa jornada. Houve muitos momentos difíceis nesta caminhada e agradeço a Deus por você estar ao meu lado me ajudando a superá-los. Aos meus filhos, Diogo e Marcos pelo carinho e compreensão durante os momentos difíceis que passei. À minha mãe Marly, que mesmo não estando mais aqui, sempre me incentivou e torceu pelas minhas conquistas.

Um agradecimento especial ao meu orientador, o professor Jocélio dos Santos Araújo pela orientação. Seus conhecimentos, dedicação, profissionalismo, paciência e empatia foram fundamentais para a conclusão deste mestrado.

Agradeço ao meu coorientador, professor Francisco Borges, pelas contribuições fundamentais para a realização da pesquisa.

Aos meus colegas de mestrado Yulian Moraes e Ilmo Ribeiro pela parceria e troca de conhecimentos ao longo do curso e que foram fundamentais ao êxito desse trabalho. Agradeço ao meu colega, professor Wagner Elvio, pelos valiosos conhecimentos transmitidos que ajudaram a viabilizar a execução deste projeto.

Gratidão a todos que contribuíram comigo direta ou indiretamente durante essa trajetória.

RESUMO

O uso de fontes de energia renováveis tem se intensificado nos últimos anos, por atenuar impactos no meio ambiente e potencializar o uso de resíduos sólidos, outrora, poluentes, em ativos ambientais e energéticos, principalmente quando utilizada a técnica de digestão anaeróbica para produção de biogás. Devido às dinâmicas atividades bioquímicas que acontecem na biodigestão, o monitoramento desse processo torna-se fundamental para maximizar a produção de metano, diminuir a produção de gás sulfídrico e consequentemente, melhorar a eficiência energética dos diferentes tipos de energia. Sendo assim, objetivou-se desenvolver um protótipo para monitoramento de um biodigestor e de um gasômetro experimental utilizando controlador, interface web e módulos sensores. Foi realizada uma pesquisa tecnológica, envolvendo as modelagens do protótipo experimental, dos elementos sensores, do controlador, da interface web e ao final dessas etapas foi realizado um ensaio de biodigestão anaeróbica. Foi realizado monitoramento em tempo real das variáveis físico-químicas (temperatura, pH, pressão, CO₂ e H₂S). Os protótipos do biodigestor e do gasômetro experimental embarcados com controlador e módulos sensores monitorado remotamente via interface web, cumpriram sua finalidade, uma vez que, o monitoramento das variáveis foi realizado de forma on-line, remota e ininterrupta, dispensando a necessidade de coleta local através de um operador, o que pode representar uma redução no custo no processo de coleta de amostras.

Palavras-Chave: Biogás, Energia renováveis, Indústria 4.0, Indústria 5.0, Interação homem-máquina, IoT.

ABSTRACT

The use of renewable energy sources has intensified in recent years, as it mitigates impacts on the environment and enhances the use of solid waste, once polluting, in environmental and energy assets, especially when using the anaerobic digestion technique for biogas production. Due to the dynamic biochemical activities that take place in biodigestion, the monitoring of this process becomes essential to maximize methane production, reduce the production of hydrogen sulfide gas and consequently improve the energy efficiency of different types of energy. Thus, the objective of this study was to develop a prototype for monitoring a biodigester and an experimental gasometer using a controller, web interface and sensor modules. A technological research was carried out, involving the modeling of the experimental prototype, the sensor elements, the controller, the web interface and at the end of these steps an anaerobic biodigestion test was carried out. Real-time monitoring of physicochemical variables (temperature, pH, pressure, CO₂ and H₂S) was performed. The prototypes of the biodigester and the experimental gasholder embedded with controller and sensor modules monitored remotely via web interface, fulfilled their purpose, since the monitoring of the variables was carried out online, remotely and uninterruptedly, eliminating the need for local collection through an operator, which can represent a reduction in the cost in the sample collection process.

Keywords: Biogas, Renewable energy, Industry 4.0, Industry 5.0, Human-machine interaction, IoT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) a partir de fontes renováveis e não renováveis em 2023.....	19
Figura 2	Diagrama do processo de digestão anaeróbia	21
Figura 3	Tecnologias associadas a indústria 4.0	27
Figura 4	Desenho preliminar do biodigestor experimental	35
Figura 5	Desenho preliminar do gasômetro e painel de controle.....	35
Figura 6	Modelo do sistema do protótipo experimental.....	36
Figura 7	Sensor MQ-4 montado em PCI.....	37
Figura 8	Curva característica do sensor MQ-4.....	39
Figura 9	Curva característica do sensor MQ-135.....	42
Figura 10	Curva característica do sensor MQ-136.....	45
Figura 11	Circuito série com dois resistores e divisor de tensão	47
Figura 12	Circuito série com valores reais	48
Figura 13	Simulação com Vin em 0V	50
Figura 14	Simulação com Vin em 2,5 V	50
Figura 15	Simulação com Vin em 5,0 V	50
Figura 16	Sensor MQ-X interligado ao microcontrolador ESP32	51
Figura 17	Transmissor de pressão NP 400	51
Figura 18	Gráfico corrente x pressão do sensor NP400	52
Figura 19	Diagrama de interligação elétrica do NP 400	53
Figura 20	Módulo conversor de corrente para tensão XY- ITOV	54
Figura 21	Circuito de teste e calibração XY-IOTV com NP400	55
Figura 22	Multímetro ET-1100 DMM	56
Figura 23	Multímetro ET-1002	56
Figura 24	Sensor de temperatura DS18B20	57
Figura 25	Diagrama de interligação do circuito de teste DS18B20/ESP32	58
Figura 26	Sensor de pH	58
Figura 27	Microcontrolador ESP32 WROOM 32.....	59
Figura 28	Diagrama dos pinos ESP32 WROOM 32	60
Figura 29	Placa base ESP32	61
Figura 30	Fluxo de leitura de dados	62
Figura 31	Fluxo de leitura de dados 2	63

Figura 32	Tela de cadastro no ThingSpeak	64
Figura 33	Tela de acesso ao ThingSpeak	64
Figura 34	Tela de apresentação de um novo canal	65
Figura 35	Tela com os canais de leitura 01 e 02 criados.....	65
Figura 36	Tela de leitura canal 01	66
Figura 37	Tela configurações do canal.....	66
Figura 38	Tela aba compartilhamento.....	67
Figura 39	Tela chaves de API	67
Figura 40	Tela valores das chaves de API no ThingSpeak	68
Figura 41	Tela valores das chaves de API no código fonte	68
Figura 42	Tela Importação/Exportação de dados	69
Figura 43	Tela de download de dados.....	69
Figura 44	Câmara do biodigestor	70
Figura 45	Gasômetro	70
Figura 46	Painel de monitoramento	71
Figura 47	Homogeneização da biomassa	72
Figura 48	Sistema de monitoramento do biodigestor.....	72
Figura 49	Gráficos de leitura dos gases.....	78
Figura 50	Gráficos de leitura temperatura, pressão e pH	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Equivalência do biogás com outras fontes de energia	24
Tabela 2	Características das versões disponíveis do ThingSpeak	32
Tabela 3	Funcionalidades dos pinos do módulo sensor.....	37
Tabela 4	Características e especificações do sensor de gás MQ4	38
Tabela 5	Características e especificações do sensor de gás MQ-135	41
Tabela 6	Características e especificações do sensor de gás MQ-136.....	44
Tabela 7	Comparativo entre valores calculados e simulados	51
Tabela 8	Características e especificações do sensor de pressão	52
Tabela 9	Especificações do módulo conversor XY-ITOV	53
Tabela 10	Configuração da tensão de saída conversor XY-IOTV	55
Tabela 11	Valores de calibração do conversor XY-IOTV	56
Tabela 12	Especificações do sensor de temperatura DS18B20.....	57
Tabela 13	Especificações do sensor BNC PH4502C.....	59
Tabela 14	Especificações do ESP32 WROOM 32	60
Tabela 15	Resultados da análise descritiva dos dados.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital
ADC1	Conversor Analógico-Digital 1 do microcontrolador ESP32
ADC2	Conversor Analógico-Digital 2 do microcontrolador ESP32
API	Interface de Programação de Aplicações
BNC	Conector Bayonet Neill-Concelman
Bluetooth LE	Bluetooth Low Energy
C	Linguagem de programação C
C++	Linguagem de programação C++
CH ₄	Gás Metano
CO	Gás Monóxido de Carbono
CO ₂	Gás Dióxido de Carbono
CPU	Unidade Central de Processamento (Central Processing Unit)
DMM	Multímetro Digital (Digital Multimeter)
DS18B20	Sensor Digital de Temperatura DS18B20
ESP32	Microcontrolador ESP32 desenvolvido pela Espressif Systems
ET	Equipamento de Teste (modelos de multímetros ET-1100 e ET-1002)
GND	Terra (Ground)
H ₂ S	Gás Sulfídrico
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto (Hypertext Transfer Protocol)
I ² C	Interface de Circuito Integrado (Inter-Integrated Circuit)
IDE	Ambiente Integrado de Desenvolvimento (Integrated Development Environment)
IHM	Interface Homem-Máquina
IoT	Internet das Coisas (Internet of Things)
LM393	Circuito Integrado Comparador de Tensão LM393
MATLAB	Matrix Laboratory (linguagem/ferramenta para análise de dados)
MQ-4	Sensor de Gás MQ-4 para detecção de metano
MQ-135	Sensor de Gás MQ-135 para detecção de dióxido de carbono
MQ-136	Sensor de Gás MQ-136 para detecção de sulfeto de hidrogênio
MQ-X	Família de Sensores de Gás MQ
MQTT	Protocolo de Telemetria de Fila de Mensagens (Message Queuing Telemetry)

Transport)

NPT	Rosca Cônica Padrão Nacional (National Pipe Taper)
PCI	Placa de Circuito Impresso
PH4502C	Sensor de pH modelo PH4502C com Sonda BNC
ppm	Partes Por Milhão (Parts Per Million)
pH	Potencial Hidrogeniônico
PWM	Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation)
RS	Resistência do Sensor
Ro	Resistência de Referência do Sensor (em ambiente limpo)
SnO ₂	Dióxido de Estanho
SPICE	Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)
SPI	Interface Periférica Serial (Serial Peripheral Interface)
ThingSpeak	Plataforma de Internet das Coisas da MathWorks
UART	Transmissão Assíncrona Universal (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
VCC	Tensão de Alimentação Positiva
VDC	Volts em Corrente Contínua (Volts Direct Current)
Vin	Tensão de Entrada (Voltage In)
Vout	Tensão de Saída (Voltage Out)
Wi-Fi	Rede de Conexão sem Fio (Wireless Fidelity)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivo Geral	17
1.3	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Energias Renováveis	19
2.2	Processo de Digestão Anaeróbia	20
2.3	Biodigestores	22
2.3.1	Classificação dos sistemas biodigestores	22
2.4	Biogás	23
2.5	Conceito de indústria 4.0	24
2.5.1	Pilares da indústria 4.0	25
2.5.2	Da indústria 4.0 para a indústria 5.0	27
2.6	Monitoramento da Digestão Anaeróbia	28
2.7	Tecnologias Embarcadas	29
2.7.1	Microcontroladores	29
2.7.2	ESP 32	29
2.7.3	Interfaces de programação do ESP 32	30
2.8	Tecnologia de medição de gases através de sensores semicondutores fabricados a partir de dióxido de estanho (SnO₂)	30
2.9	Plataforma ThingSpeak	31
2.10	Monitoramento de sistemas industriais através de redes sem fio	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Modelagem do protótipo experimental (1ª etapa)	34
3.2	Modelagem dos elementos sensores (2ª etapa)	36
3.2.1	Sensor para mensuração do gás metano (CH ₄)	38
3.2.2	Curva característica do sensor MQ-4	38
3.2.3	Sensor para mensuração do dióxido de carbono (CO ₂)	40
3.2.4	Curva característica do sensor MQ-135	41
3.2.5	Sensor para mensuração do sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	44
3.2.6	Curva característica do sensor MQ-136	44
3.2.7	Circuito condicionador de sinais entre sensores MQ e microcontrolador ESP32 utilizando divisor de tensão	47

3.2.7.1	Fórmula do divisor de tensão	47
3.2.7.2	Simulação dos circuitos com o software Multisim	49
3.2.7.3	Comparação entre os valores de tensão de saída calculados e os valores simulados no Multisim	51
3.2.7.4	Circuito Conversor de sinal acoplado ao microcontrolador ESP32	51
3.2.8	Transmissor de pressão	51
3.2.9	Sensor de temperatura	56
3.2.10	Sensor de pH	58
3.3	Modelagem do controlador (3ª etapa)	59
3.3.1	Modelagem do controlador – Hardware.....	59
3.3.2	Placa base para suporte do ESP32 WROOM 32	61
3.3.3	Modelagem do controlador – Software	61
3.4	Modelagem da interface de monitoramento via web (4ª etapa).....	62
3.4.1	Utilização da plataforma ThingSpeak	63
3.4.2	Criando um canal ThingSpeak	63
3.4.3	Configurando os canais de leitura dos sensores no ThingSpeak.....	66
3.4.3.1	Aba Configurações do Canal.....	66
3.4.3.2	Aba Compartilhamento	67
3.4.3.3	Aba Chaves de API	67
3.4.3.4	Aba Importação/Exportação de dados.....	68
3.5	Ensaio de biodigestão anaeróbia (5ª etapa).....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1	Protótipo do sistema biodigestor monitorados remotamente.....	74
4.2	Hardware do sistema – Controlador ESP32	74
4.3	Hardware do sistema – Sensores.....	75
4.4	Software de monitoramento remoto	77
4.5	Discussão das análises descritivas dos dados e suas implicações no processo de digestão anaeróbica	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A: CÓDIGO FONTE UTILIZADO PELO ESP32	90

1 INTRODUÇÃO

O uso de fontes de energia renováveis tem se intensificado nos últimos anos, objetivando mitigar os efeitos nocivos da emissão de gases de efeito estufa, potencializando o uso de resíduos sólidos, outrora, poluentes, em ativos ambientais e energéticos. Embora a tecnologia de uso da biomassa para geração de energia, não seja uma prática recente, todavia, nos últimos anos se intensificaram as pesquisas para utilização desses biorrecursos, devido a grande quantidade de produção dessa matéria-prima, com potencial de geração de energia limpa e renovável, como também, por apresentar resposta a sociedade quanto ao uso adequado dessas biomassas e mitigar os impactos no meio ambiente (IEA,2023).

No processo de biodigestão anaeróbica, diversos gases são produzidos por diferentes rotas metabólicas, destacando-se principalmente o metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3). Outros fatores como pH e temperatura também influenciam no processo metabólico, interferindo na população microbiana que utilizam a biomassa que resultarão em biogás e ao final do processo em digestato, que posteriormente podem ser utilizados como biofertilizantes em lavouras para produção de novas biomassas (Kunz *et al.*, 2022).

Segundo Conti *et al.* (2018), os sistemas de digestão anaeróbica usam a biomassa residual para produzir energia renovável na forma de biogás. Para maximizar a produção, condições ideais para decomposição de materiais orgânicos em digestores devem ser avaliadas. Todavia, o monitoramento dessas condições anaeróbicas, não são observadas em tempo real, devido aos dinâmicos processos bioquímicos que acontecem na biodigestão, porém, é de fundamental importância o acompanhamento do processo, em decorrência de poder maximizar a produção de metano, diminuir a produção de gás sulfídrico e consequentemente, melhorar a eficiência energética dos diferentes tipos de energia.

Neste contexto, o monitoramento de reatores anaeróbicos utilizando controlador, IHM (Interface Homem-Máquina), com interface web e módulos sensores de gases podem se constituir numa tecnologia de monitoração que permite analisar as variáveis que interferem no processo de biodigestão microbiana e melhorar a eficiência desse processo. Entre as vantagens desse sistema, está por permitir a apresentação dos dados em tempo real, e posteriormente, com o recebimento dos dados e transmissão através dos módulos sensores, podem ser processados e interpretados, permitindo ao operador do biodigestor, interferir no processo de biodigestão,

quando verificar que algumas variáveis físico-química, não são ideais para melhor eficiência energética.

1.1 Justificativa

O processo de digestão anaeróbica é complexo e sensível a vários intermediários metabólicos que afetam a produção de gás e sua qualidade. Interferências nos parâmetros físico-químicos — como pH e temperatura — podem diminuir a eficiência energética. Com o monitoramento em tempo real, é possível detectar rapidamente desvios, intervir nas condições operacionais e, assim, maximizar a geração de metano e reduzir a produção de gases indesejáveis (WU et al., 2021).

Destaca-se também que, as análises dos diferentes gases que compõem o biogás, envolvem processos analíticos complexos e os equipamentos que os quantificam têm valores de mercado considerados elevados, sendo utilizados principalmente em empreendimentos com alto nível tecnológico, sendo assim, a utilização de controlador, interface web e módulo sensores de gases, podem constituir-se numa alternativa eficiente de aferição do biogás, com menor custo operacional.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo experimental para monitoramento de um biodigestor e de um gasômetro, utilizando um controlador, interface web e módulos sensores, com a finalidade de realizar o acompanhamento em tempo real dos parâmetros operacionais do processo de biodigestão.

1.3 Objetivos Específicos

Instalar e calibrar módulos sensores específicos para monitoramento das variáveis físico-química do processo de biodigestão anaeróbica e do biogás.

Desenvolver um software embarcado e implementar comunicação via Wi-Fi para coleta e transmissão dos dados provenientes dos módulos sensores, integrando-os à plataforma microprocessada ESP32.

Desenvolver uma interface homem-máquina (IHM) por meio de uma plataforma web voltada para a visualização, monitoramento e análise em tempo real dos parâmetros coletados

pelos módulos sensores.

Desenvolver a plataforma IoT (Internet das Coisas) para monitoramento remoto.

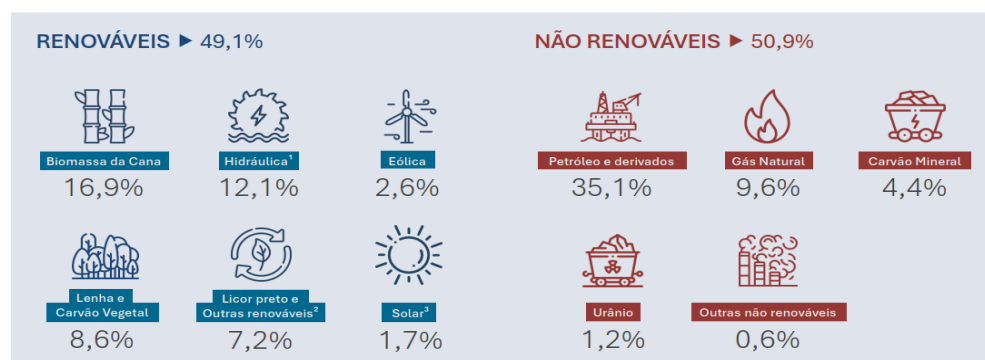
Realizar testes funcionais do sistema de automação monitorando etapas do processo da biodigestão e avaliando seus resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energias Renováveis

As mudanças climáticas cada vez mais severas, ocasionadas pelos gases de efeito estufa, evidenciam a necessidade de utilização de fontes de energia renováveis visando produzir uma energia mais limpa e com isso, minimizar os impactos nocivos gerados por fontes poluentes que estão mudando os padrões climáticos, colocando em perigo os seres humanos e outras formas de vida existentes. Neste cenário, diversos países ao redor do mundo têm buscado aumentar a utilização de energias renováveis. De acordo com a *International Energy Agency* (2024), países como China, Estados Unidos, Brasil, Índia e União Europeia estão entre os maiores geradores de energias renováveis do mundo. No Brasil, segundo a EPE (2024), por meio do Balanço Energético Nacional, as fontes de energia renováveis representaram 49,1% da Oferta Interna de Energia (OIE) 2023. A OIE representa o consumo total energético do país, com a inclusão de usos não elétricos como queima de combustíveis para transporte, utilização comercial e residencial, agroindústria e outros. Ainda segundo a EPE, a participação de energias renováveis na matriz elétrica brasileira, que inclui todo o Sistema Interligado Nacional, os sistemas isolados e a autoprodução não-injetada na rede foi de 89,2% em 2023. Na figura 1 é apresentada a repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) a partir de fontes renováveis e não renováveis em 2023.

Figura 1 – Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) a partir de fontes renováveis e não renováveis em 2023



Fonte: EPE (2024)

2.2 Processo de Digestão Anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia é um processo bioquímico que ocorre de maneira natural em condições anaeróbias, ou seja, na ausência de oxigênio molecular livre, na qual grupos de diferentes espécies de microrganismos interagem para transformar compostos orgânicos complexos em substâncias simples como os gases amônia, carbônico, metano e sulfídrico (Chernicharo, 1997). Segundo Souza (1984),

A digestão anaeróbia é um processo fermentativo a que são submetidos diversos tipos de resíduos (urbanos, rurais ou industriais), com uma ou mais das seguintes finalidades: tratamento dos resíduos (remoção da matéria orgânica poluente e dos microrganismos), produção de biogás e produção de biofertilizantes mais estáveis, mais ricos em nutrientes assimiláveis e com melhores qualidades sanitárias em relação ao material original.

Conforme menciona (Freihe, Weiland e Schattauer, 2010) a biodigestão anaeróbia acontece em quatro etapas principais divididas a seguir:

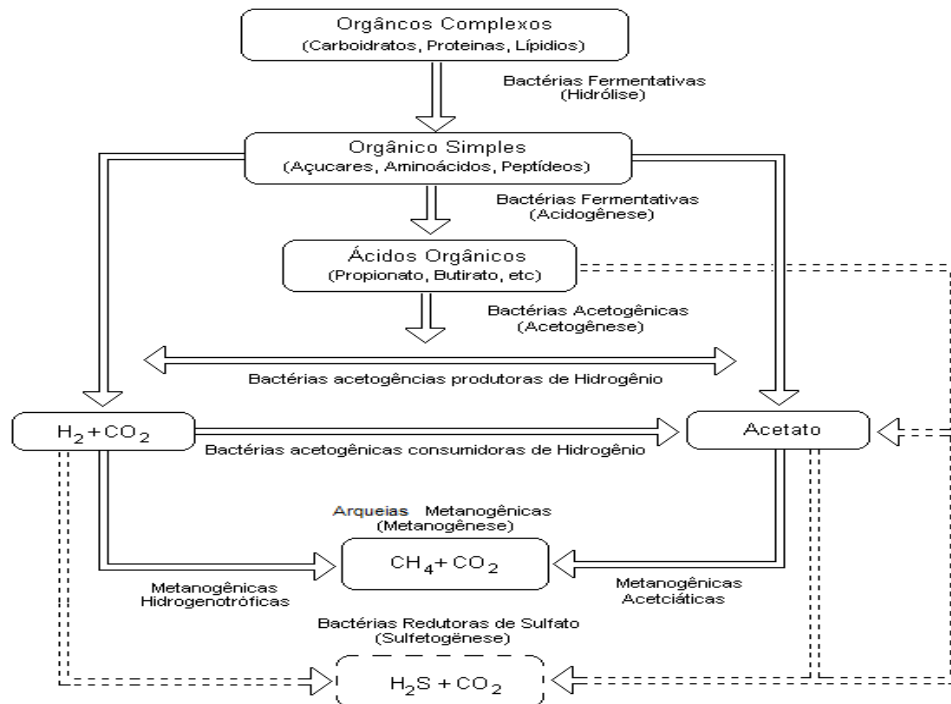
- Hidrólise: É o primeiro estágio do processo, em que compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídios são decompostos em substâncias de menor complexidade como ácidos graxos, açúcares e aminoácidos. Neste processo atuam organismos bacterianos especializados conhecidos por bactérias hidrolíticas. Estas bactérias liberam enzimas que acabam por decompor o material através de reações bioquímicas.

- Acidogênese: Neste estágio, os compostos intermediários formados são decompostos em ácidos graxos de cadeia curta (ácidos acético, propiônico e butírico, além de dióxido de carbono e hidrogênio, por ação de bactérias fermentativas acidogênicas. Existe a formação de pequenas quantidades de ácido lático e álcoois.

- Acetogênese: É o terceiro estágio desse processo, em que os compostos são convertidos por bactérias acetogênicas em elementos considerados precursores do biogás, que são o ácido acético, hidrogênio e o dióxido de carbono.

- Metanogênese: É o último estágio no processo de formação do biogás. Nesta etapa as arqueas metanogênicas que são anaeróbias passam a converter de forma prioritária o ácido acético, dióxido de carbono e o hidrogênio em metano. Na figura 2 é mostrado o diagrama com o processo de digestão anaeróbia.

Figura 2 – Diagrama do processo de digestão anaeróbia



Fonte: Chernicharo (1997)

Souza (1984) afirma que a etapa de metanogênese é considerada uma fase extremamente crítica no processo de produção de gás, fato este que ocorre em razão da alta sensibilidade das bactérias metanogênicas a diferentes fatores como o estado do substrato utilizado no processo, as características construtivas do biodigestor e as condições ambientais. Alguns dos seguintes fatores devem ser objeto de uma maior observação, como:

- **Oxigênio:** as arqueas metanogênicas são microrganismos que precisam de um ambiente livre de oxigênio para que possam sobreviver. A presença de oxigênio pode ocasionar a mortandade de bactérias na biomassa
- **Temperatura:** deve ser evitado grandes variações de temperatura às bactérias metanogênicas em função delas serem sensíveis a acentuadas variações de temperatura. Considerando que o processo pode ocorrer nas faixas mesofílica que vai de 15 a 45°C ou na faixa termofílica, que vai de 50 à 65°C.
- **Valor do pH:** diferentes valores de pH são necessários para que os microrganismos envolvidos nos diferentes estágios de decomposição possam ter seu desenvolvimento ótimo. No caso das bactérias hidrolíticas e acidogênicas, a faixa ideal de pH varia entre 5,2 e 6,3. Por outro lado, as bactérias acetogênicas e as arqueas metanogênicas trabalham numa faixa de pH

neutro que varia entre 6,5 e 8. Desta forma os processos de fermentação realizados devem obedecer às faixas adequadas de pH.

De acordo com (Freihe, Weiland e Schattauer, 2010),

De modo geral, as quatro fases da decomposição anaeróbia ocorrem paralelamente em um processo de um único estágio. No entanto, uma vez que as bactérias têm exigências diferentes quanto ao seu habitat, tais como pH e a temperatura, deve ser definido um meio termo em relação a tecnologia do processo.

2.3 Biodigestores

Os biodigestores anaeróbios são elementos arquitetônicos normalmente construídos em formato cilíndrico ou retangular que são utilizados para o desenvolvimento e armazenamento temporário de microrganismos anaeróbios, responsáveis por transformar a matéria inorgânica ou orgânica em biofertilizante e biogás (Hermann, 2019).

Conforme Silva *et al.* (2012), existe neste processo anaeróbio uma série de microrganismos responsáveis por transformar moléculas complexas de matéria orgânica em compostos mais simples que ao serem metabolizados resultam em uma mistura de gases e diversos compostos reduzidos.

2.3.1 Classificação dos sistemas biodigestores

A literatura classifica os biodigestores sobre diversos aspectos. Como por exemplo, quanto ao teor de sólidos, forma de alimentação e número de estágios e, também, pela quantidade de resíduo orgânico tratado (Filho, 2014).

Os biodigestores podem ser classificados por sua forma de operação, assim como seu modelo. Na classe operacional eles podem ser do tipo batelada ou contínuo (Andrade, 2021).

Os biodigestores do modelo batelada recebem o carregamento da matéria orgânica onde só será realizada sua substituição após o período adequado à digestão de todo o lote. Nos modelos contínuos os biodigestores são construídos para que sejam abastecidos diariamente, fazendo com que tenha a entrada de substrato orgânico para ser processado e a saída do material já tratado (Oliver, 2008).

Andrade (2021) afirma que, em relação aos modelos de biodigestores mais utilizados no Brasil, destacam-se o modelo indiano, o modelo canadense e o modelo chinês. Esses três modelos utilizam o modo de operação contínuo, ao contrário do biodigestor de batelada.

O modelo indiano é caracterizado por possuir campânula com gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação, ou em selo d'água externo e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. O modelo indiano possui pressão de operação constante em função do deslocamento do gasômetro em função do aumento da pressão. Do ponto de vista construtivo, apresenta-se de fácil construção, contudo o gasômetro de metal pode encarecer o custo final, além da distância da propriedade que pode encarecer o transporte inviabilizando a implantação deste modelo de biodigestor. O modelo chinês é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria de tijolo para fermentação, com teto abobadado e impermeável, destinado ao armazenamento do biogás. Este biodigestor através do princípio de prensa hidráulica, no qual um aumento ou diminuição de pressão em seu interior, ocasionado pelo biogás, provoca o deslocamento do efluente entre a câmara de manutenção e a caixa de saída (Deganutti *et al.*, 2002).

O modelo canadense, também conhecido como Biodigestor da Marinha, é construído em formato horizontal que possui uma maior produção de biogás, uma vez que possui uma grande área de exposição aos raios solares. A sua cúpula é construída em lona de PVC, que se expande à medida que aumenta a produção de gases. Possui fácil instalação e manutenção além de uma alta capacidade de produção de biogás, e em função disso é um dos modelos mais utilizados dentre as opções de sistemas de biodigestores. Possui também a vantagem de possibilitar a produção de gás de maneira contínua (Torres, Pedrosa e Moura, 2012).

2.4 Biogás

O biogás é composto por uma combinação de gases como o metano, gás carbônico, hidrogênio, nitrogênio e ácido sulfídrico que são produzidos por meio da digestão anaeróbia de hidrocarbonetos. É um gás que é utilizado como combustível que possui as vantagens de ser renovável e ter uma queima limpa. O biogás em contrapartida a outros biocombustíveis como o álcool de cana-de-açúcar, não demanda a necessidade de competir por terras que podem ser utilizadas na produção de alimentos. O biogás pode ser obtido a partir dejetos de animais ou de resíduos agrícolas, podendo ser considerado uma importante ferramenta para o saneamento ambiental. Como é um combustível renovável, acaba contribuindo também para minimizar o efeito dos gases de efeito estufa oriundos dos dejetos orgânicos como os de animais e vegetais. O poder calorífico do biogás varia entre 5.000 e 7.000 kcal/m³ (Oliver, 2008). Na tabela 1 é mostrado o equivalente de 1 m³ comparado com outras fontes de energia.

Tabela 1 – Equivalência do biogás com outras fontes de energia

Equivalência energética de 1 m³ de biogás com outras fontes de energia
0,79 litro de álcool hidratado
1,5 quilo de lenha
0,45 litro gás de cozinha
0,55 litro de óleo diesel
0,58 litro de querosene
0,61 litro de gasolina
Fonte: Adaptado de Oliver (2008)

2.5 Conceito de indústria 4.0

A apresentação oficial da Platform Industrie 4.0, ou simplesmente Industria 4.0 foi realizada durante a Feira de Hanover ocorrida em 2013 na Alemanha, com ampliação formalizada em 2015. Em 2018, Alemanha, França e Itália formalizaram uma parceria para promoção e disseminação do conceito. Desta colaboração surgiram algumas iniciativas como a *Platform Industrie 4.0* na Alemanha, a *Alliance Industrie du Futur* na França e a *Piano Industria 4.0* na Itália. A Industria 4.0 tem como característica a integração de tecnologias da informação e comunicação nos processos industriais e que estão se tornando um fenômeno ascendente na automação industrial. Neste sistema, os componentes físicos da produção e seus componentes virtuais que são baseados em dados da produção são interconectados em termos de informação, proporcionando operações autônomas que promovem a eficiência e a aprendizagem contínua do processo ao qual fazem parte (Zezulka *et al.*, 2022).

Hermann *et al.* (2016) afirma que a indústria 4.0 alcançou amplitude global e que apesar disso seus princípios básicos de implementação permanecem os mesmos, sendo eles:

- Operação monitorada em tempo real: A coleta das informações se dá de forma instantânea, não sendo necessário a presença física no ambiente fabril para a tomada de decisões, uma vez que é possível o acesso remoto em tempo real à todas as operações da planta.
- Virtualização: A virtualização tem sido largamente empregada nos processos produtivos, uma vez que permite que sejam feitas simulações que incrementam a confiabilidade dos processos e ajudam a reduzir os custos operacionais. Isto é feito do avanço da ferramenta que possibilita a criação de fábricas digitais onde é feito o controle e rastreamento de processos remotamente.

- Descentralização: A descentralização é uma característica própria dos sistemas cyber físicos que possibilita a troca constante de informações e desta forma, esses sistemas possuem a capacidade de tomar decisões em tempo real, sem a necessidade da intervenção humana.

- Orientação a serviços: A orientação dos serviços é caracterizada por desenvolvimento de programas personalizados voltados aos serviços da indústria 4.0. A internet dos serviços fica responsável por integrar usuários e máquinas através de programas que são adaptáveis a cada necessidade gerando maior flexibilidade e usabilidade de soluções integradas.

- Modularidade: A modularidade visa promover a flexibilização dos processos de produção, uma vez que permite a alteração do layout físico da linha através da inserção e retirada dos módulos produtivos entre si, promovendo assim uma manufatura mais dinâmica e rápida em função de diversas combinações existentes.

- Interoperabilidade: Pode ser definida como a capacidade de troca de informações entre os sistemas cyber físicos utilizando a internet e a internet das coisas.

2.5.1 Pilares da Indústria 4.0

Conforme afirmam Souza, Cavallari Junior e Delgado Neto (2017), a Indústria 4.0 busca apresentar soluções que visam elevar o nível de competitividade do mercado de forma a aumentar a qualidade de vida em âmbito geral dentro de uma sociedade, uma vez que a estagnação no setor industrial reflete em uma baixa qualidade de vida. A implementação efetiva da Indústria 4.0 deve ser feita com base nos pilares apresentados a seguir:

- Big data e Analytics: referem-se ao armazenamento e análise de dados processados para análise em tempo real ou em um momento posterior. As análises feitas a partir dos dados obtidos possibilitam que sejam tomadas decisões estratégicas em diversos níveis da cadeia de produção (Blanchet *et al.*, 2014).

- Computação em nuvem: as informações são armazenadas na nuvem computacional e podem ser acessadas remotamente de qualquer localidade. A estrutura da computação em nuvem é composta basicamente por recursos físicos como os servidores e lógicos, como softwares. O acesso descentralizado as informações possibilitam tomadas de decisões de forma mais rápida (Yen *et al.*, 2014).

- Cibersegurança: atualmente cada vez mais dispositivos estão sendo conectados à internet. A Internet das Coisas é considerada uma tecnologia fundamental no contexto da indústria 4.0 pois abre caminho para a implementação de diversos sistemas industriais, hospitalares, domésticos e outros cada vez mais inteligentes e interligados. O grande problema

desta interconexão se dá em função de que muitos dos dispositivos inseridos neste universo não têm suporte adequado para suportar invasões cibernéticas comprometendo a segurança e a privacidade de dados. Portanto, é de extrema importância que esses dispositivos e sistemas sejam protegidos por sistemas de cibersegurança de forma a mitigar os efeitos causados por ataques cibernéticos (Sadeghi, Wachsman; Waidner, 2015).

- Internet das Coisas: trata-se de uma infraestrutura que permite a conexão de diversos dispositivos físicos com a internet permitindo-os enviar e receber dados. Esta conexão se dá por meio de dispositivos eletrônicos que possibilitam a troca de dados entre o software e o hardware, criando assim os sistemas ciber físicos (Miorandi *et al.*, 2012).

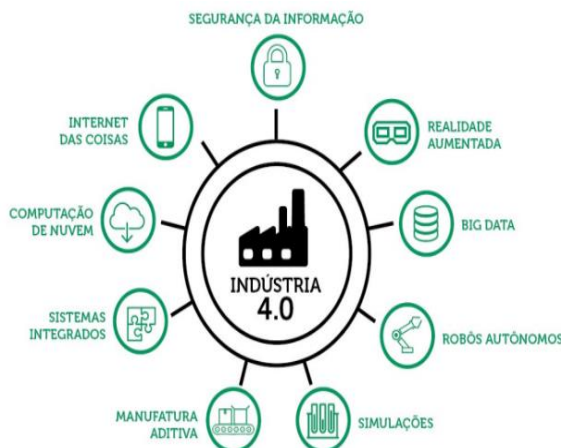
- Inteligência Artificial: o conceito de inteligência artificial começou a ser discutido após o evento da segunda guerra mundial e atualmente engloba uma diversidade de subáreas que compreendem o aprendizado e a percepção, passando a tarefas mais específicas que podem ir de um simples jogo até o diagnóstico precoce de uma doença. Os sistemas de IA são projetados para replicar, e em muitos casos, superar a capacidade humana de realizar tarefas que tradicionalmente exigem inteligência (Russell; Norvig, 2022).

- Manufatura Aditiva: refere-se à produção de componentes individuais ou protótipos por intermédio de tecnologias como a impressão 3D. Isso permite aos fabricantes conseguirem testar seus conceitos através da impressão de protótipos reduzindo dessa forma o custo e o tempo de um projeto (Brant; Sundaram, 2015).

- Realidade Aumentada: a realidade aumentada é uma ferramenta que permite que o usuário perceba o mundo real com objetos virtuais compostos ou sobrepostos com o mundo real. Desta forma, a realidade aumentada acaba complementando a realidade em vez de substituí-la completamente. A realidade aumentada pode ser considerada um termo médio entre as tecnologias de realidade virtual, que é totalmente sintética e a telepresença que é totalmente real (Azuma, 1997).

- Robôs autônomos são dispositivos que integram hardware e software com outros sistemas fabris, possuindo a capacidade de tomar decisões com base nas informações recebidas de sensores responsáveis por captar o estado do ambiente e enviar esses dados ao controlador. Além disso, os robôs autônomos podem tomar decisões sobre situações previamente programadas (Universal Robots, 2023). A figura 2 apresenta as principais tecnologias associadas a chamada Quarta Revolução Industrial também conhecida como Indústria 4.0.

Figura 3 – Tecnologias associadas a indústria 4.0



Fonte: Muniz e Nascimento (2018)

2.5.2 Da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0

Diversos esforços acadêmicos têm impulsionado a introdução da chamada indústria 5.0 desde o ano de 2017, mas somente em 2021 a Comissão Europeia apresentou formalmente o conceito indústria 5.0. Considerada a próxima etapa da transformação industrial, apresenta um novo paradigma acrescentando os princípios de sustentabilidade, resiliência e centralidade no ser humano. Segundo a Comissão Europeia, o conceito visa não apenas aumentar a produtividade e a eficiência, mas também gerar valor para a sociedade, respeitar os limites do planeta e promover o bem-estar dos trabalhadores (Xu et al., 2021). O modelo da indústria 5.0 tem a sua sustentação através de três pilares principais:

- Centrada no humano: As tecnologias são desenvolvidas para promover a melhoria da qualidade de vida dos trabalhadores através da ergonomia, inclusão e segurança (Kaasinen et al., 2022).
- Sustentabilidade: A implementação de processos industriais alinhados com a responsabilidade ambiental, redução de resíduos, economia circular e na otimização da utilização dos recursos naturais (Saniuk et al., 2022).
- Resiliência: Capacidade de estruturar sistemas produtivos com maior flexibilidade e robustez de forma a possibilitar uma reação ágil a situações de crise, interrupções ou mudanças de mercado (Fraga-Lamas et al., 2021).

Além dos pilares anteriormente citados, existem outros princípios que caracterizam a Indústria 5.0 que são:

- Customização em massa: Produção customizada conforme as necessidades do cliente, mantendo a eficiência da produção em larga escala (Prassidaa; Asfarib, 2021).

- Foco no bem-estar dos trabalhadores: As tecnologias são desenvolvidas para promover a melhoria das condições de trabalho, eliminar tarefas exaustivas e reduzir riscos ergonômicos (Longo et al., 2020).

- Digitalização com inteligência aumentada: A digitalização não substitui o ser humano, mas amplia sua capacidade decisória, utilizando tecnologias como inteligência artificial, gêmeos digitais, big data e realidade aumentada (Maddikunta et al., 2022). Ainda segundo Maddikunta et al. (2022) a indústria 5.0 possui as seguintes tecnologias habilitadoras como:

- Big Data, Analytics e Interligência Aumentada.
- Computação em Nuvem e Edge Computing.
- Cibersegurança e Ética Digital.
- Internet das Coisas (IoT) e Internet dos Humanos (IoH).
- Inteligência Artificial Centrada no Humano.
- Manufatura Aditiva Sustentável.
- Realidade Aumentada e Realidade Virtual.
- Robôs Colaborativos.

2.6 Monitoramento da Digestão Anaeróbia

De maneira geral, os processos anaeróbios estão sujeitos a interferências em função fatores com a mudança nas condições ambientais e fatores relacionados as condições de operação do sistema, o que torna necessário o controle e monitoramento do processo de digestão anaeróbia de forma a melhorar a eficiência do processo. Segundo Bohrz (2010), quando esses fatores são corretamente monitorados, podem contribuir para uma melhor atividade bacteriana, resultando em um aumento na produção de metano. Para Shubeita *et al.* (2014), um sistema de controle e monitoramento eficiente deve ser on-line, automatizado, robusto, possuindo a capacidade de identificar instabilidades e possibilitar a execução de contramedidas que possam reestabelecer a normalidade do sistema.

2.7 Tecnologias Embarcadas

2.7.1 Microcontroladores

De acordo com IBM (2025), um microcontrolador é de forma elementar um computador pequeno encapsulado em um único chip, que é projetado para executar tarefas específicas incorporados a um sistema, não demandando a necessidade de utilizar um sistema operacional de alta complexidade.

Um microcontrolador de uso geral possui pinos utilizados para conectar sinais externos de entrada e saída ao dispositivo, além de alimentação, clock e sinais de controle (Bolton, 2010).

De acordo com IBM (2025), os microcontroladores são constituídos dos principais componentes a seguir:

- Memória: os microcontroladores possuem memórias voláteis utilizadas para armazenar dados de forma temporária, que perdem suas informações quando a alimentação é desligada. Possuem também memórias do tipo não volátil que são responsáveis por armazenar a programação escrita pelo usuário juntamente com o firmware do microcontrolador, que é o programa residente responsável por fornecer as diretrizes de programação do dispositivo.

- Periféricos: os microcontroladores possuem diversos periféricos que são utilizados de acordo com a necessidade da aplicação. Dentre esses periféricos podemos citar as interfaces de entrada e saída, que são responsáveis por enviar e receber sinais elétricos analógicos e digitais. Possuem também protocolos de comunicação como UART, SPI, I2C e Ethernet.

- Unidade Central de Processamento: a unidade central de processamento é responsável pelo controle e execução de todas as operações realizadas pelo microcontrolador. A unidade central de processamento regula funções internas, supervisiona o consumo de energia e realiza a interface com aplicativos e redes.

2.7.2 ESP 32

O ESP 32 é um microcontrolador que foi desenvolvido pela empresa *Espressif Systems* e foi lançado no mercado em 2016. O ESP 32 possui algumas características interessantes como o seu tamanho compacto, alto poder de processamento e a capacidade nativa de conexão à internet, tornando o mesmo um dispositivo bastante utilizado em projetos que envolva conceito

de internet das coisas (IoT). Estas características tornam o ESP32 uma opção bastante utilizada, devido à alta gama de aplicações onde pode ser aplicado (Kolban, 2017).

2.7.3 Interfaces de programação do ESP 32

O ESP 32 possui diversas interfaces de programação suportadas por ele, permitindo aos usuários a escolha da linguagem e a interface de acordo com as suas necessidades. Algumas das principais interfaces utilizadas são:

Arduino IDE: A Arduino IDE é uma interface de programação desenvolvida inicialmente para programar principalmente dispositivos da família Arduino, mas que foi ampliada para utilização na programação de microcontroladores ESP-8266 e ESP 32. Nesta interface de programação é possível desenvolver, compilar e transferir o programa para o microcontrolador facilitando o desenvolvimento do projeto (Andrade, 2021).

ESP-IDF: É o framework oficial desenvolvido pela Espressif Systems que pode ser utilizado para a programação do microcontrolador ESP 32. Esta interface de programação utiliza as linguagens C e C++, juntamente com um conjunto de bibliotecas e ferramentas para acesso e utilização dos recursos do ESP 32, permitindo o desenvolvimento de aplicações complexas (Espressif Systems, 2025).

2.8 Tecnologia de medição de gases através de sensores semicondutores fabricados a partir de dióxido de estanho (SnO_2)

O monitoramento de gases através de sensores semicondutores de dióxido de estanho (SnO_2) é considerado uma alternativa interessante para a detecção de gás devido ao baixo custo e a simplicidade de utilização. (Delgado-Castro; Rojas-Bolaños, 2015). De acordo com Maciel et al. (2003), o dióxido de estanho (SnO_2) é considerado um dos materiais mais utilizados para sensores para gás juntamente com o óxido de zinco (ZnO). O dióxido de estanho é considerado um bom elemento sensor e vem sendo empregado em diversos campos por apresentar características como alta condutividade elétrica, alta estabilidade química, mecânica e térmica.

Segundo Delgado-Castro e Rojas-Bolaños (2015), os sensores semicondutores de dióxido de estanho (SnO_2), possuem algumas vantagens e desvantagens que devem ser levadas em conta em sua utilização, conforme a seguir:

As vantagens são:

- Compatibilidade com plataformas eletrônicas de baixo custo, como Arduino.
- Possibilita coleta e análise de dados de forma remotamente e de forma automática através das interfaces computacionais necessárias para interpretar o seu funcionamento em contrapartida a maioria dos analisadores de gases convencionais.
- Possibilita a implementação de protótipos para utilização em projetos educacionais envolvendo diversas áreas como eletrônica, computação, química e outros.

Quanto às desvantagens, são as seguintes:

- Necessita de dispositivos externos para funcionar, como fontes, interfaces e controladores.
- Necessita de uma fonte de calor interna, o que ocasiona um aumento no consumo de energia. A fonte adicional de calor pode tornar inviável o uso em alguns sistemas portáteis.
- Possui baixa seletividade na leitura dos gases uma vez que os sensores a base de dióxido de estanho (SnO_2) detectam uma ampla gama de substâncias, fator este que pode ocasionar dificuldade na identificação de um gás específico dentro de uma mistura de gases.
- Pode necessitar de ajustes e calibrações frequentes uma vez que pode ser afetado com variações de umidade e temperatura ambiente.

2.9 Plataforma ThingSpeak

O ThingSpeak é uma plataforma on-line dedicada a aplicações de internet das coisas que permite armazenar, analisar e visualizar fluxos de dados na nuvem vindos de sensores e outros dispositivos (Mathworks, 2025).

Conforme afirma MathWorks (2025), a plataforma suporta comunicação com os protocolos HTTP e MQTT possibilitando a integração da mesma a diversos dispositivos comumente utilizados como o Arduino e ESP32. Além deste, a plataforma possui outros recursos como:

- Visualização em tempo real dos dados do sensor através de canais que permitem armazenar dados onde os campos são utilizados para monitoramento de diversos tipos de variáveis;
- Possibilidade de integração com o software MATLAB permitindo análises avançadas do processo monitorado;
- Permite a criação de protótipos e sistemas de IoT sem a necessidade de configurar servidores ou desenvolvimento de software web, e

- Permite a visualização de dados através de celulares e tablets através do aplicativo ThingView disponível para o sistema operacional Android.

O ThingSpeak é disponibilizado em diversas modalidades de licença disponíveis para atender as demandas de acordo com as necessidades da pesquisa. Para pequenos projetos é disponibilizada uma versão gratuita e para projetos de maior porte ou comerciais são disponibilizadas as versões: Academic, Home, Standard e Student (Mathworks, 2025). As características principais de cada licença são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Características das versões disponíveis do ThingSpeak

Características das versões do ThingSpeak				
	Aplicação	Mensagens	Tempo de atualização	Número de canais
Gratuita	Pequenos projetos/Avaliação	3 milhões por ano	15 segundos	4 canais
Academic	Professores/pesquisadores	33 milhões por ano	1 segundo	250 canais por unidade
Home	Uso pessoal	33 milhões por ano	1 segundo	250 canais por unidade
Standard	Atividades comerciais geradoras de receita	33 milhões por ano	1 segundo	250 canais por unidade
Student	Estudantes	33 milhões por ano	1 segundo	250 canais por unidade

Fonte: Adaptado MathWorks (2025)

2.10 Monitoramento de sistemas industriais através de redes sem fio

Em ambientes industriais, a comunicação entre os controladores e os sistemas de supervisão se dá em grande parte, por cabeamento desde o surgimento dos primeiros sistemas de automação industrial onde são utilizadas grandes quantidades de cabos interligando as salas de controle e supervisão com o chão de fábrica permitindo a troca de dados entre estes dispositivos (Rios, 2019).

A alta confiabilidade na transmissão e recepção de dados é uma das principais vantagens da sua utilização, uma vez que existem poucas perdas de dados entre os dispositivos. A tecnologia de transmissão de dados sem fio (wireless) surgiu como uma opção a comunicação

cabeada, tendo como vantagem a eliminação da necessidade de cabeamento para que haja comunicação entre os dispositivos. Durante algum tempo essa tecnologia era pouco utilizada no ambiente industrial em função das interferências causadas por interferências eletromagnéticas e físicas. Com o surgimento de novas tecnologias de hardware e software que suportam a comunicação sem fio, seu uso passou a ser mais intenso no ambiente industrial (Rios, 2019).

De acordo com Rios (2019), existem diversas opções de tecnologias de transmissão sem fio que possuem como características principais a alta confiabilidade na transmissão de dados, baixa suscetibilidade a interferência e baixo consumo de potência. São exemplos dessas tecnologias a WirelessHart, ZigBee, LoRaWAN, Bluetooth e WiFi.

Lugli e Santos (2013) destacam que as redes industriais que demandam a utilização de cabos necessitam de investimentos altos decorrentes da necessidade da implementação de infraestrutura e mão de obra necessária para a instalação. Em contrapartida, a utilização das redes sem fio proporciona a redução dos custos de infraestrutura, mão de obra e de manutenção, uma vez que sua instalação é mais simplificada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho desenvolvido trata-se de uma pesquisa tecnológica, aplicada ao campo do conhecimento que se ocupa de projetar artefatos, planejar sua construção, operação, configuração, manutenção e acompanhamento, com base no conhecimento científico (Cupani, 2006).

Com fundamentação na literatura científica, que foram estudadas sobre o processo de digestão anaeróbica e os fatores que influenciam nesse processo na produção de biogás Chernicharo (1997); Freihe, Weiland e Schattauer (2010) e Silva *et al.* (2012), substanciaram os procedimentos metodológicos da pesquisa, que foram divididas em cinco etapas, sendo:

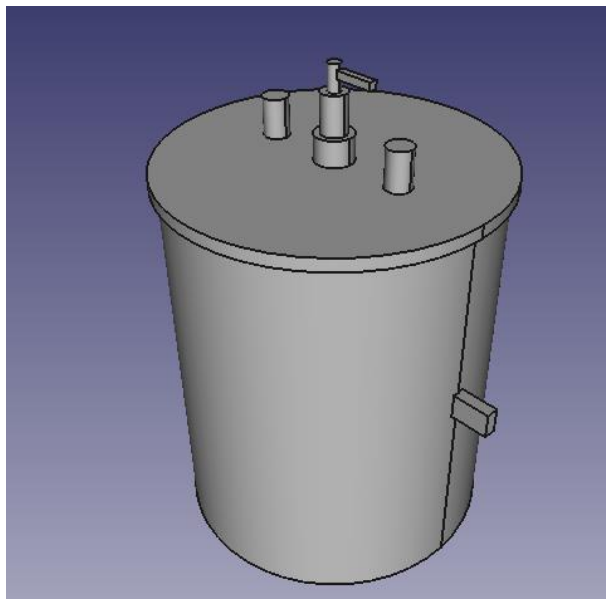
- 1ª etapa – Modelagem do protótipo experimental.
- 2ª etapa – Modelagem dos elementos sensores.
- 3ª etapa – Modelagem do controlador.
- 4ª etapa – Modelagem da interface web.
- 5ª etapa – Ensaio de biodigestão anaeróbia.

3.1 Modelagem do protótipo experimental (1ª etapa)

Foram realizados desenhos arquitetônicos preliminares, para definição dos escopos dos protótipos experimentais (biodigestor, gasômetro e painel de controle), utilizando o software FreeCAD, de modelagem 3D de código aberto. Após a definição da arquitetura tecnológica, procedeu-se a fabricação dos protótipos experimentais e posteriores testes funcionais do sistema de automação, monitorando etapas do processo da biodigestão e avaliação dos resultados.

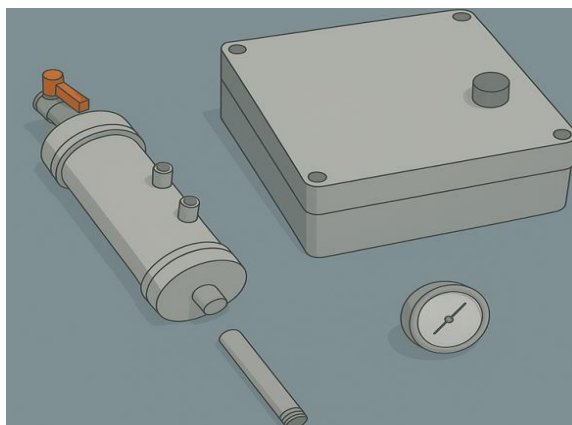
Na figura 4 é mostrado o desenho do biodigestor experimental e na figura 5, o gasômetro e o painel de controle.

Figura 4 – Desenho preliminar do biodigestor experimental



Fonte – O autor (2025)

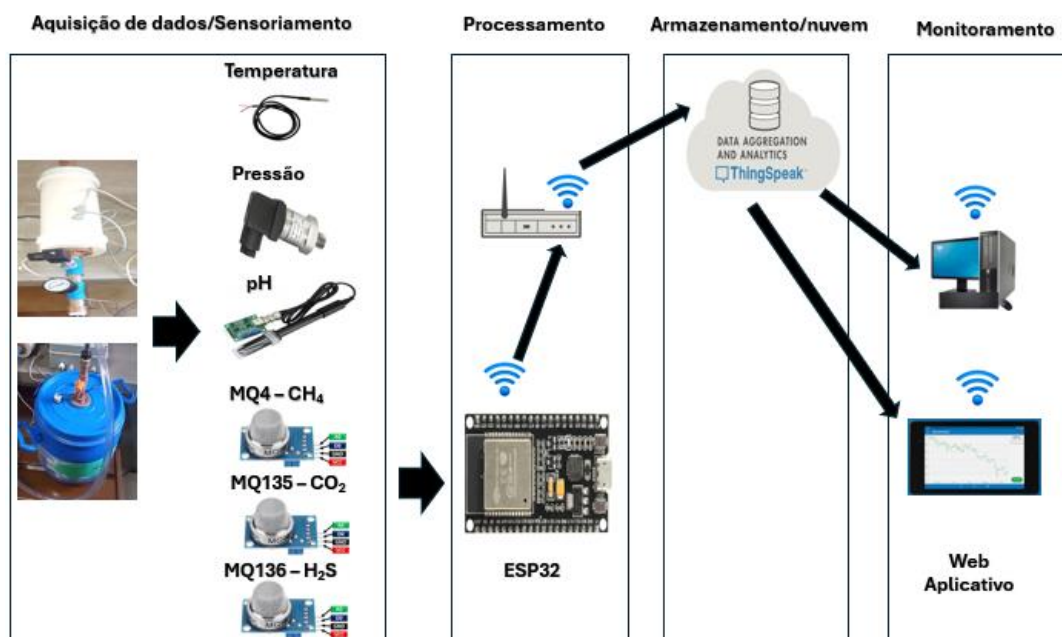
Figura 5 – Desenho preliminar do gasômetro e painel de controle



Fonte – O autor (2025)

Em síntese, para melhor compreensão do modelo do sistema que constituíram os protótipos experimentais (câmara/reator anaeróbico, gasômetro e o painel de monitoramento) utilizando os controladores, interface web e os módulos sensores, são apresentadas na figura 6.

Figura 6 – Modelo do sistema do protótipo experimental



Fonte - O autor (2025)

No gasômetro, foram instalados os sensores dos gases: metano (MQ4 – CH₄), dióxido de carbono (MQ135 – CO₂) e sulfídrico (MQ136 – H₂S), além do sensor de pressão. Na câmara de biodigestão foram instalados os sensores de temperatura e pH.

Todos os sensores foram instalados de aberturas compatíveis com o formato e fixados e vedados para evitar vazamentos de gases, permitindo o envio das variações elétricas/eletrônicas e leituras dos respectivos sensores para o painel de monitoramento. Após o processo de prototipagem do biodigestor experimental com os sensores, foi realizado teste de estanqueidade de forma a garantir que o sistema estivesse hermeticamente fechado e manter a eficiência no processo da biodigestão anaeróbica.

Com a definição do desenho arquitetônico, posteriormente procedeu-se a confecção dos protótipos (biodigestor, gasômetro e painel) e o ensaio experimental para operacionalização, cuja descrição consta na 5ª etapa da pesquisa (ensaio de biodigestão anaeróbica).

3.2 Modelagem dos elementos sensores (2ª etapa)

Os elementos sensores eletrocatalíticos, ou simplesmente, sensores, utilizados no experimento para medição da concentração de gases, foram os sensores da família MQ-“X”. Neste tipo de sensores, o “X” é substituído por um número que indica quais os tipos de gases

cada sensor é capaz de detectar. Esses tipos de sensores são integrados juntos com as placas que já conta com o circuito necessário para seu pronto funcionamento, além de contar com um circuito comparador para funcionalidade de alarme de concentração de gases.

Foram realizados testes individuais em cada sensor utilizado na presente pesquisa, para averiguar suas funcionalidades iniciais com leituras preliminares, objetivando monitorar as variações dos valores analógicos e adequações nas calibrações. Os sensores foram montados em placa de circuito impresso (PCI) são apresentados conforme figura 7.

Figura 7 - Sensor MQ-4 montado em PCI



Fonte: Microcontrollerslab (2025)

As funcionalidades de cada pino do sensor são apresentadas conforme tabela 3.

Tabela 3 - Funcionalidades dos pinos do módulo sensor

Pino	Função
VCC	Alimentação de +5Vcc
GND	Pino de referência
A0	Saída analógica. Sinal proporcional a concentração do gás detectado
D0	Saída digital. Ativa a saída, quando um determinado limite é alcançado

Fonte: Adaptado do Microcontrollerslab.com

Para obtenção das leituras dos sensores foram utilizadas equações de pontos específicos pertencentes a curva característica de cada sensor, visto que ela é uma constante para cada um dos sensores utilizados na presente pesquisa. A equação foi convertida em linguagem de programação utilizada para microcontrolador, metodologia utilizada para fornecer a leitura da concentração de gases conforme preconizado por Carrillo-Amado *et al.* (2020).

Para encontrar as equações, obteve-se dois pontos da reta correspondente a cada gás analisado pelos sensores, cuja descrições para cada sensor estão apresentadas abaixo.

3.2.1 Sensor para mensuração do gás metano (CH₄)

Para a leitura do gás metano, foi utilizado o sensor MQ4, no qual as principais características e especificações são apresentadas na tabela 4.

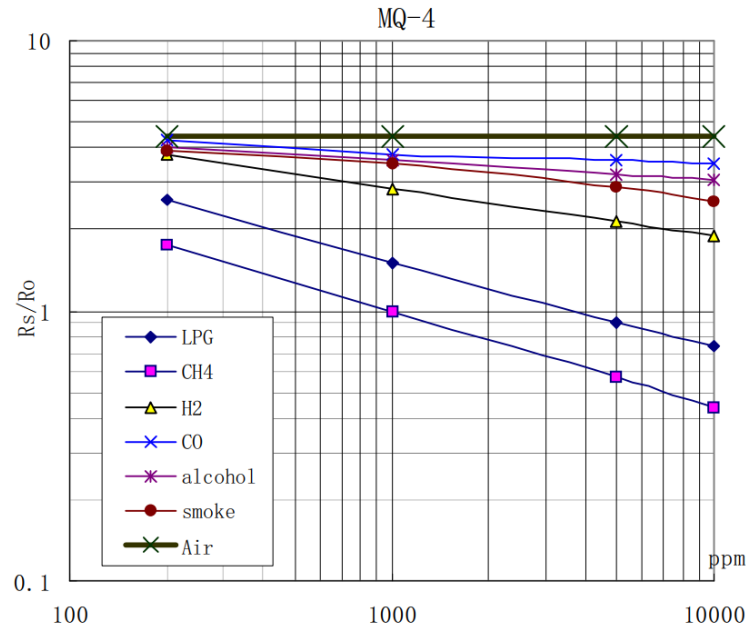
Tabela 4 - Características e especificações do sensor de gás MQ4

Características e Especificações do sensor	
Tensão de operação	5VDC
Tensão de aquecimento	5VDC
Resistencia de carga	20KΩ ou 1KΩ
Faixa da resistência de detecção	10KΩ - 60KΩ
Resistência de aquecimento	33Ω
Faixa de medição (em PPM)	300 - 10000
Dissipação de potência	< 750mW
Umidade Relativa	< 95%
Concentração de oxigênio padrão	21%
Tempo de pré-aquecimento	Maior que 24 horas
Tensão de saída analógica	Entre 0 e 5VDC
Tensão de saída digital	0 ou 5VDC
Temperatura de operação	-10° C à 50° C
Chip	LM393

Fonte: Adaptado do datasheet sensor MQ-4 (2024)

3.2.2 Curva característica do sensor MQ-4

O sensor MQ-4, possui uma curva característica de funcionamento mostrada na figura 8. Esta curva apresenta a resposta em partes por milhão (ppm) do sensor para diferentes gases em função da relação $\frac{R_s}{R_o}$, onde R_s , é a resistência do sensor em diferentes concentrações de gases e R_o , é a resistência do sensor em uma concentração de 1000 ppm, em um ambiente com ar limpo.

Figura 8 - Curva característica do sensor MQ-4

Fonte: Adaptado do datasheet sensor MQ-4 (2024)

Para o sensor MQ-4 o valor de R_s pode variar entre $10K\Omega$ até $60K\Omega$ de acordo com o datasheet do sensor, e em função desta variação foi necessário realizar a calibração manual do sensor para obter melhores leituras dos gases monitorados.

O gráfico do sensor MQ-4 obedece a uma escala logarítmica para os dois eixos e para determinar a equação foi utilizada a interpolação logarítmica-logarítmica, que utiliza os mesmos princípios da interpolação linear. A interpolação permite a obtenção de pontos intermediários baseados em dados conhecidos, na qual técnicas de interpolação linear podem ser adaptadas e utilizadas para gráficos em escalas logarítmicas (Press *et al.*, 2007).

Para determinar esta equação, foram obtidos do gráfico mostrado na figura 8, os pontos $X_1=1000$; $Y_1=1$ e os pontos $X_2=5000$ e $Y_2=0,58$. Estes pontos foram utilizados na equação de interpolação logarítmica (4) a fim de determinar a relação do coeficiente $y = R_s/R_o$ com a saída x correspondente a concentração em ppm do gás metano.

Os pontos obtidos no gráfico deverão ser substituídos na equação 1 conforme abaixo.

$$\log(y) - \log(y_1) = \frac{\log(y_2) - \log(y_1)}{\log(x_2) - \log(x_1)} * (\log(x) - \log(x_1)) \quad (\text{equação 1})$$

$$\log\left(\frac{y}{y_1}\right) = \left(\frac{\log\left(\frac{y_2}{y_1}\right)}{\log\left(\frac{x_2}{x_1}\right)}\right) * \log\left(\frac{x}{x_1}\right)$$

$$\log\left(\frac{y}{1}\right) = \left(\frac{\log\left(\frac{0,58}{1}\right)}{\log\left(\frac{5000}{1000}\right)}\right) * \log\left(\frac{x}{1000}\right)$$

$$\log(y) = \left(\frac{\log(0,58)}{\log(5)}\right) * \log\left(\frac{x}{1000}\right)$$

$$\log(y) = \left(\frac{-0,237}{0,699}\right) * \log\left(\frac{x}{1000}\right)$$

$$\log(y) = -0,339 * \log\left(\frac{x}{1000}\right)$$

$$\log\left(\frac{x}{1000}\right) = \frac{\log(y)}{-0,339}$$

$$\log\left(\frac{x}{1000}\right) = -2,95 * \log(y)$$

$$\log(x) - \log(10^3) = -2,95 * \log(y)$$

$$\log(x) = \log(10^3) + \log(y^{-2,95})$$

$$\log(x) = \log(10^3 * y^{-2,95})$$

$$x = 10^3 * y^{-2,95} \quad (\text{equação 1})$$

Através da equação 1, foi possível obter o valor da concentração de gás do sensor MQ-4, onde x, corresponde a esta concentração em ppm, e y corresponde ao coeficiente R_s/R_o , mencionado anteriormente.

3.2.3 Sensor para mensuração do dióxido de carbono (CO₂)

O sensor modelo MQ-135, foi utilizado para leitura de dióxido de carbono, com as seguintes especificações apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 - Características e especificações do sensor de gás MQ-135

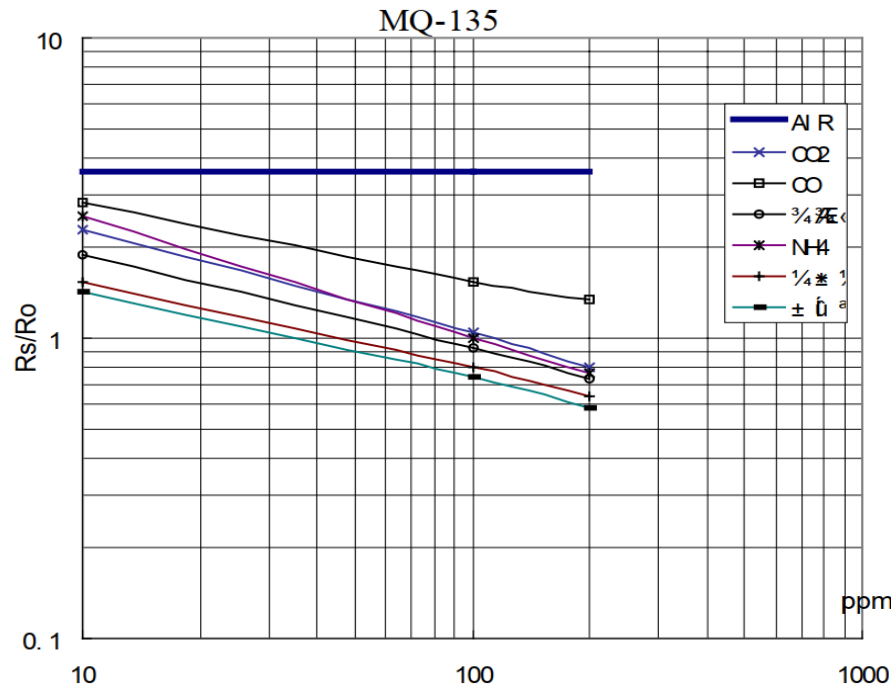
Características e Especificações do sensor	
Tensão de operação	5VDC
Tensão de aquecimento	5VDC
Resistencia de carga	20KΩ ou 1KΩ
Faixa da resistência de detecção	30KΩ - 200KΩ
Resistência de aquecimento	33Ω
Faixa de medição (em PPM)	10 - 1000
Dissipação de potência	< 800mW
Umidade Relativa	< 95%
Concentração de oxigênio padrão	21%
Tempo de pré-aquecimento	Maior que 24 horas
Tensão de saída analógica	Entre 0 à 5VDC
Tensão de saída digital	0 ou 5VDC
Temperatura de operação	-10° C à 45° C
Chip	LM393

Fonte: Datasheet do sensor MQ-135 (2024)

3.2.4 Curva característica do sensor MQ-135

O sensor MQ-135, possui uma curva característica de funcionamento apresentada na figura 9. Esta curva apresenta a resposta em partes por milhão (ppm) do sensor para diferentes gases em função da relação $\frac{R_s}{R_o}$, onde R_s , é a resistência do sensor em diferentes concentrações de gases e R_o , é a resistência do sensor em uma concentração de 100 ppm, em um ambiente com ar limpo.

Figura 9 - Curva característica do sensor MQ-135



Fonte: Datasheet do sensor MQ-135 (2024)

A relação $\frac{R_s}{R_o}$ varia em função dos valores individuais das resistências R_s e R_o , que conforme mencionado anteriormente variam de acordo com a concentração de gases presentes no ambiente. Para o sensor MQ-135, o valor de R_s pode variar entre $30K\Omega$ até $200K\Omega$ de acordo com o datasheet do sensor, e em função desta variação, também se fez a calibração manual do sensor para obtenção de melhores leituras dos gases monitorados.

O gráfico do sensor MQ-135 também obedece a uma escala logarítmica para os dois eixos e para determinarmos a equação foi utilizada a interpolação logarítmica-logarítmica, que utiliza os mesmos princípios da interpolação linear (Press *et al.*, 2007).

Para determinar esta equação, foram obtidos do gráfico apresentado na figura 9, os pontos $X_1=100$; $Y_1=1$ e os pontos $X_2=200$ e $Y_2=0,8$. Estes pontos foram utilizados na equação de interpolação logarítmica (2) a fim de determinar a relação do coeficiente $y = R_s/R_o$ com a saída x correspondente a concentração em ppm, do dióxido de carbono.

Os pontos obtidos no gráfico 6, foram substituídos na equação 2, conforme abaixo.

$$\log(y) - \log(y_1) = \frac{\log(y_2) - \log(y_1)}{\log(x_2) - \log(x_1)} * (\log(x) - \log(x_1)) \quad (\text{equação 2})$$

$$\log\left(\frac{y}{y_1}\right) = \left(\frac{\log\left(\frac{y_2}{y_1}\right)}{\log\left(\frac{x_2}{x_1}\right)}\right) * \log\left(\frac{x}{x_1}\right)$$

$$\log\left(\frac{y}{1}\right) = \left(\frac{\log\left(\frac{0,8}{1}\right)}{\log\left(\frac{200}{100}\right)}\right) * \log\left(\frac{x}{100}\right)$$

$$\log(y) = \left(\frac{\log(0,8)}{\log(2)}\right) * \log\left(\frac{x}{100}\right)$$

$$\log(y) = \left(\frac{-0,097}{0,301}\right) * \log\left(\frac{x}{100}\right)$$

$$\log(y) = -0,322 * \log\left(\frac{x}{100}\right)$$

$$\log\left(\frac{x}{100}\right) = \frac{\log(y)}{-0,322}$$

$$\log\left(\frac{x}{100}\right) = -3,10 * \log(y)$$

$$\log(x) - \log(100) = -3,10 * \log(y)$$

$$\log(x) = \log(100) + \log(y^{-3,10})$$

$$\log(x) = \log(100 * y^{-3,10})$$

$$x = 100 * y^{-3,10} \quad (\text{equação 2})$$

Da equação 2 foi possível encontrar o valor da concentração de gás do sensor MQ-135, onde x, corresponde a esta concentração em ppm, e y corresponde ao coeficiente R_s/R_o , já mencionado anteriormente.

3.2.5 Sensor para mensuração do sulfeto de hidrogênio (H₂S)

O sensor utilizado para medir a quantidade de gás sulfídrico produzido no biodigestor durante o processo foi o modelo MQ-136. Na tabela 6 são apresentadas as principais características e especificações do módulo sensor MQ-136.

Tabela 6 - Características e especificações do sensor de gás MQ-136

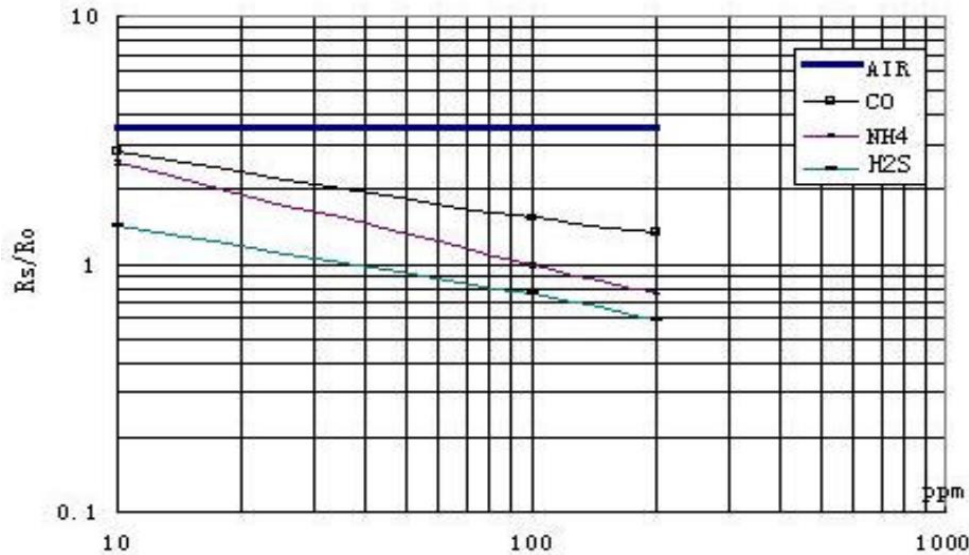
Características e Especificações do sensor	
Tensão de operação	5VDC
Tensão de aquecimento	5VDC
Resistencia de carga	20K Ω ou 1K Ω
Faixa da resistência de detecção	30K Ω - 200K Ω
Resistência de aquecimento	31 Ω
Faixa de medição (em PPM)	1 - 100
Dissipação de potência	< 800mW
Umidade Relativa	< 95%
Concentração de oxigênio padrão	21%
Tempo de pré-aquecimento	Maior que 24 horas
Tensão de saída analógica	Entre 0 à 5VDC
Tensão de saída digital	0 ou 5VDC
Temperatura de operação	-10° C à 45° C
Chip	LM393

Fonte: Adaptado do datasheet sensor MQ-136 (2024)

3.2.6 Curva característica do sensor MQ-136

A curva característica de funcionamento do sensor MQ-136, é apresentada na figura 10.

Figura 10 - Curva característica do sensor MQ-136
MQ-136



Fonte: Datasheet do sensor MQ-136 (2024)

A relação $\frac{R_s}{R_o}$ varia em função dos valores individuais das resistências R_s e R_o , que conforme mencionado anteriormente variam de acordo com a concentração de gases presentes no ambiente. Para o sensor MQ-136 o valor de R_s pode variar entre $30K\Omega$ até $200K\Omega$ de acordo com o datasheet do sensor, e em função desta variação foi necessário realizar a calibração manual do sensor para obtenções das melhores leituras do gás sulfídrico.

Para encontrar a equação, também se obteve os dois pontos da reta correspondente ao gás sulfídrico (H_2S). E como nos demais sensores anteriormente citados, o gráfico do sensor MQ-136, também obedece a uma escala logarítmica para os dois eixos, e para determinar a equação foi utilizada a interpolação logarítmica-logarítmica, proposta por Press *et al.* (2007).

Para determinar a equação, foram obtidos do gráfico mostrado na figura 10, os pontos $X_1=40$; $Y_1=1$ e os pontos $X_2=100$ e $Y_2=0,8$. Estes pontos deverão ser utilizados na equação de interpolação logarítmica (3) a fim de determinar a relação do coeficiente $y = R_s/R_o$ com a saída x correspondente a concentração em ppm do gás sulfídrico.

Os pontos obtidos no gráfico foram substituídos na equação 3, conforme abaixo:

$$\log(y) - \log(y_1) = \frac{\log(y_2) - \log(y_1)}{\log(x_2) - \log(x_1)} * (\log(x) - \log(x_1)) \quad (\text{equação 3})$$

$$\log\left(\frac{y}{y_1}\right) = \left(\frac{\log\left(\frac{y_2}{y_1}\right)}{\log\left(\frac{x_2}{x_1}\right)}\right) * \log\left(\frac{x}{x_1}\right)$$

$$\log\left(\frac{y}{1}\right) = \left(\frac{\log\left(\frac{0,8}{1}\right)}{\log\left(\frac{100}{40}\right)}\right) * \log\left(\frac{x}{40}\right)$$

$$\log(y) = \left(\frac{\log(0,8)}{\log(2,5)}\right) * \log\left(\frac{x}{40}\right)$$

$$\log(y) = \left(\frac{-0,097}{0,398}\right) * \log\left(\frac{x}{40}\right)$$

$$\log(y) = -0,243 * \log\left(\frac{x}{40}\right)$$

$$\log\left(\frac{x}{40}\right) = \frac{\log(y)}{-0,243}$$

$$\log\left(\frac{x}{40}\right) = -4,11 * \log(y)$$

$$\log(x) - \log(40) = -4,11 * \log(y)$$

$$\log(x) = \log(40) + \log(y^{-2,95})$$

$$\log(x) = \log(40 * y^{-4,11})$$

$$x = 40 * y^{-4,11} \quad (\text{equação 3})$$

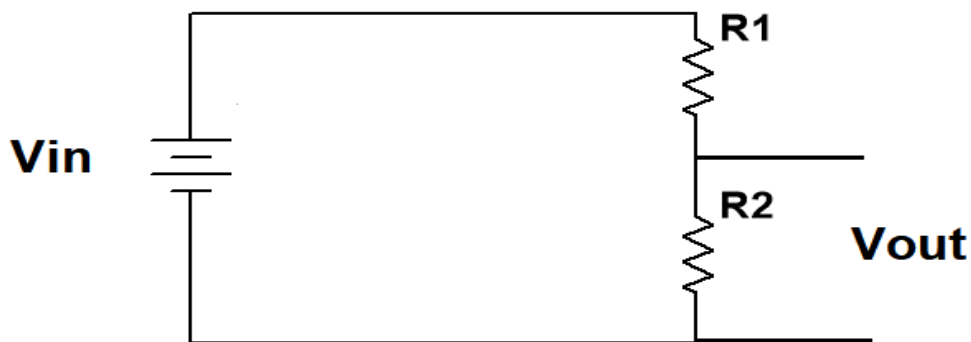
Da equação 3 foi possível encontrar o valor da concentração de gás do sensor MQ-136, onde x, corresponde a esta concentração em ppm, e y corresponde ao coeficiente R_s/R_o .

3.2.7 Circuito condicionador de sinais entre sensores MQ e microcontrolador ESP32 utilizando divisor de tensão

Na arquitetura do sistema de controle e monitoramento do biodigestor foi utilizada a plataforma com o microcontrolador ESP32, desenvolvido pela empresa *Espressif Systems* e, conforme já mencionado, uma de suas características é a de operar com sinais elétricos para entradas e saídas cujo nível máximo de tensão de 3,3Vcc. Os sensores de gases da família MQ-X operam com tensão de alimentação e de sinais de saída no valor de 5VCC. Dessa forma, foi necessário condicionar o sinal de saída dos sensores de forma que fossem compatíveis com os circuitos do ESP32. Para solução desse problema foi utilizado um circuito divisor de tensão resistivo, que é uma solução simples e de fácil implementação. Em um circuito divisor de tensão resistivo, a tensão em um resistor ligado em série a outros resistores e a uma fonte de tensão é igual à razão entre o valor da resistência do resistor e a resistência total (Dorf; Svoboda, 2011).

Na figura 11 é apresentado um circuito em série com dois resistores e fonte de alimentação.

Figura 11 - Circuito série com dois resistores e divisor de tensão



Fonte: O autor (2024)

3.2.7.1 Fórmula do divisor de tensão

A equação (4) foi utilizada para determinar o valor da tensão de saída (V_{out}) em função do valor da tensão de entrada (V_{in}) e dos valores dos resistores $R1$ e $R2$.

$$V_{out} = \frac{R2}{R1 + R2} * V_{in} \quad (\text{equação 4})$$

Uma vez que foram conhecidos os valores da tensão de entrada (V_{in}) e da tensão de saída (V_{out}) foi possível atribuir um valor padrão a um dos resistores e utilizar a equação para

determinar o valor do outro resistor. Neste trabalho, o valor de V_{in} é aproximadamente $5V_{cc}$, que corresponde a máxima tensão que o sensor conseguirá fornecer. A tensão de saída V_{out} é aproximadamente $3,3V_{cc}$, que corresponde ao máximo valor de tensão que o controlador ESP32 consegue suportar. Esta tensão de valor próximo ao valor de $3,3V_{cc}$ foi medida sobre o resistor R_2 . Para este trabalho foi atribuído o valor comercial de $1K\Omega$ ou $1000\ \Omega$ para o resistor R_2 , e desta forma foi determinado o valor que será utilizado para o resistor R_1 . A equação 5 foi utilizada para determinar o valor de R_1 .

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{in} \quad (\text{equação 5})$$

$$3,3 = \frac{1000}{R_1 + 1000} * 5$$

$$3,3 = \frac{5000}{R_1 + 1000}$$

$$3,3 * R_1 + 3300 = 5000$$

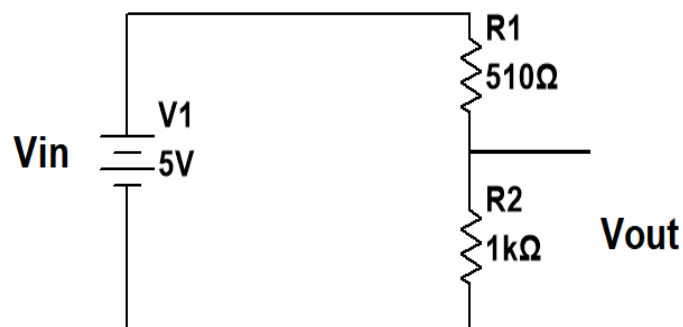
$$3,3 * R_1 = 5000 - 3300$$

$$R_1 = 1700/3,3$$

$$R_1 = 515,1\ \Omega$$

O circuito da figura 12 apresenta a configuração com os valores reais e que foi utilizada no presente estudo. O resistor calculado de $515,1\ \Omega$ foi substituído por um resistor de $510\ \Omega$, por não ser um valor comercialmente disponível.

Figura 12 - Circuito série com valores reais



Fonte: O autor (2024)

Para verificar o comportamento do circuito divisor de tensão, foram calculados três valores da tensão de saída (V_{out}) correspondentes a três valores de entrada (V_{in}), utilizando os resistores R_1 igual a 510 Ohms e R_2 igual a 1 K Ohms:

- Para $V_{in} = 0V$:

$$V_{out} = \frac{1000}{1000 + 510} * 0 = 0V$$

- Para $V_{in} = 2,5V$:

$$V_{out} = \frac{1000}{1000 + 510} * 2,5 = 1,655V$$

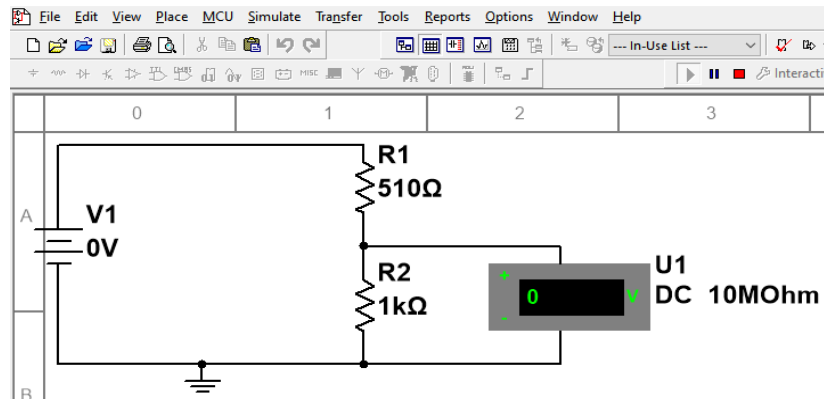
- Para $V_{in} = 5V$:

$$V_{out} = \frac{1000}{1000 + 510} * 5 = 3,311V$$

3.2.7.2 Simulação dos circuitos com o software Multisim

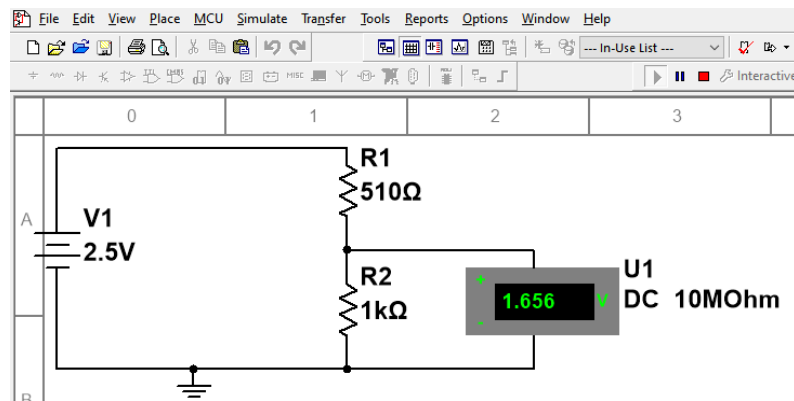
Uma vez encontrados os resultados dos cálculos, foram realizadas simulações do funcionamento do circuito através do software Multisim, desenvolvido pela *National Instruments*. O Multisim é um software de simulação e projeto SPICE (*Simulation Program With Integrated Circuit Emphasis*) utilizado para visualizar e analisar o comportamento dos circuitos eletrônicos, auxiliando pesquisadores e projetistas a reduzirem tempo e custos de desenvolvimento através da ferramenta de simulação (National Instruments, 2024). As figuras de 13, 14 e 15 apresentam o comportamento da tensão de saída (V_{out}) nos circuitos utilizando os valores de tensão de entrada (V_{in}) e os valores dos resistores R_1 e R_2 .

Figura 13 - Simulação com Vin em 0V



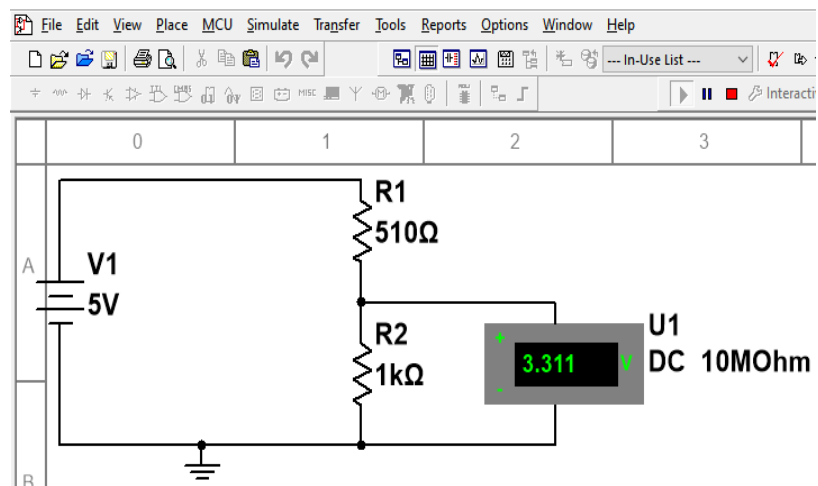
Fonte: O autor (2024)

Figura 14 - Simulação com Vin em 2,5 V



Fonte: O autor (2024)

Figura 15 - Simulação com Vin em 5,0 V



Fonte: O autor (2024)

3.2.7.3 Comparação entre os valores de tensão de saída calculados e os valores simulados no Multisim

A tabela 7 apresenta um comparativo entre os valores teóricos calculados e os valores obtidos através da simulação no Multisim.

Tabela 7 - Comparativo entre valores de tensão calculados e simulados

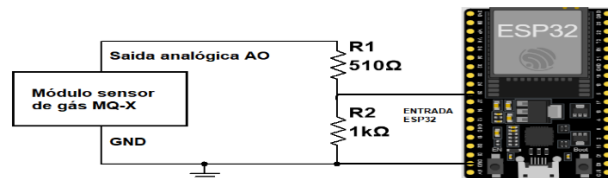
Vin(V)	Calculado Vout(V)	Simulado Vout(V)	Diferença em Volts
0	0	0	0
2,5	1,655	1,656	0,001
5	3.311	3,311	0

Fonte: O autor (2024)

3.2.7.4 Circuito Conversor de sinal acoplado ao microcontrolador ESP32

A figura 16 apresenta o modelo da interligação que será utilizada entre os sensores MQ-X e o microcontrolador ESP32 através do circuito conversor de sinal.

Figura 16 - Sensor MQ-X interligado ao microcontrolador ESP32



Fonte: O autor (2024)

3.2.8 Transmissor de pressão

Para medir a pressão manométrica dos gases e enviar esta informação ao microcontrolador, foi utilizado o transmissor de pressão modelo NP 400 (figura 17).

Figura 17 - Transmissor de pressão NP 400



Fonte: Manual do transmissor de pressão NP 400 Novus (2024)

As principais especificações do transmissor de pressão NP 400 estão descritas na tabela 8.

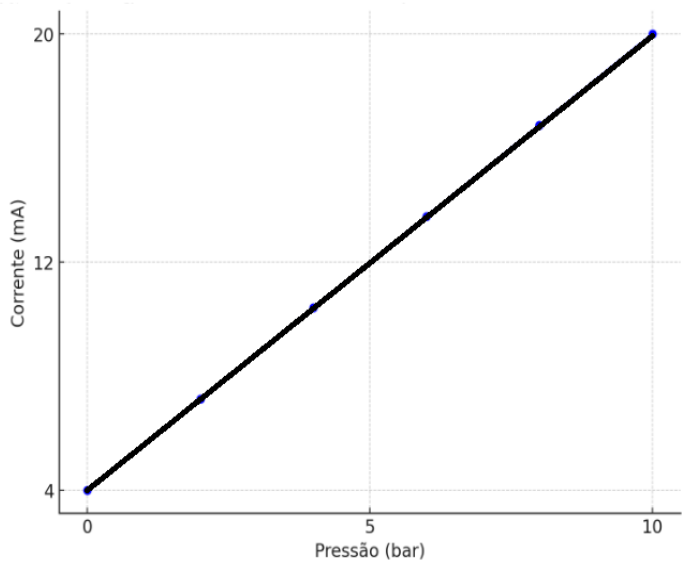
Tabela 8 - Características e especificações do sensor de pressão

Características e Especificações do sensor	
Tensão de operação	11 à 33VDC
Sinal de saída	4 a 20mA, dois fios
Conexão elétrica	Conector DIN EM 175301-803
Conexão da tomada de pressão	¼ NPT
Range de pressão de entrada	0 a 10 bar
Temperatura de meio	-20° C à 100° C
Tipo do sensor	Cerâmico Al ₂ O ₃

Fonte: Adaptado do manual do transmissor de pressão NP 400

A saída deste sensor foi dada em corrente no valor de 4 a 20mA, que é proporcional a entrada de pressão que está na faixa de 0 a 10 bar, conforme apresentado na figura 18.

Figura 18 - Gráfico corrente x pressão do sensor NP400

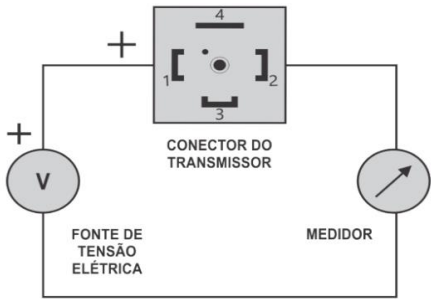


Fonte: O autor (2024)

O NP 400, possui calibração e certificação do fabricante, para que funcione de acordo com o que foi projetado e com as informações apresentadas no manual de operação deste

instrumento (Novus, 2024). Na figura 19 é apresentado o diagrama de interligação elétrica deste instrumento.

Figura 19 - Diagrama de interligação elétrica do NP 400



Fonte: Manual do transmissor de pressão NP 400

Para utilizar o transmissor NP400 neste estudo foi necessária a utilização de um módulo conversor de corrente para tensão uma vez que este sensor fornece apenas sinal de corrente de 4 a 20mA, e o microcontrolador ESP32 recebe sinais de tensão de 0 a 3,3V. Sendo assim, foi utilizado um módulo conversor de corrente para tensão 4-20mA para 0-3,3V/5V/10V, modelo XY-ITOV (Robotics.org.za, 2024).

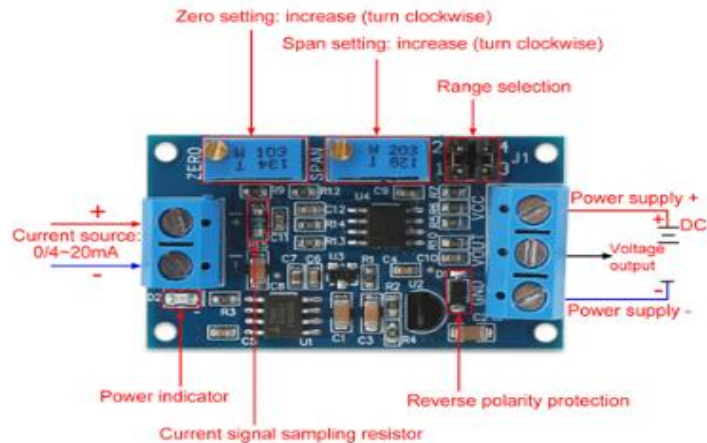
Na tabela 9 são apresentadas as principais especificações deste módulo conversor e na figura 20 é apresentado o layout da placa com um descritivo de suas funcionalidades.

Tabela 9 - Especificações do módulo conversor XY-ITOV

Especificações do conversor XY- ITOV	
Tensão de operação	7 à 35VDC
Sinal de entrada	4 a 20mA
Sinal de saída	0-2,5VDC /3,3VDC/5VDC/10VDC
Ajuste de zero	Através de trimpot
Ajuste de span	Através de trimpot

Fonte: Adaptado da página do XY-ITOV no site Robotics.org.za.

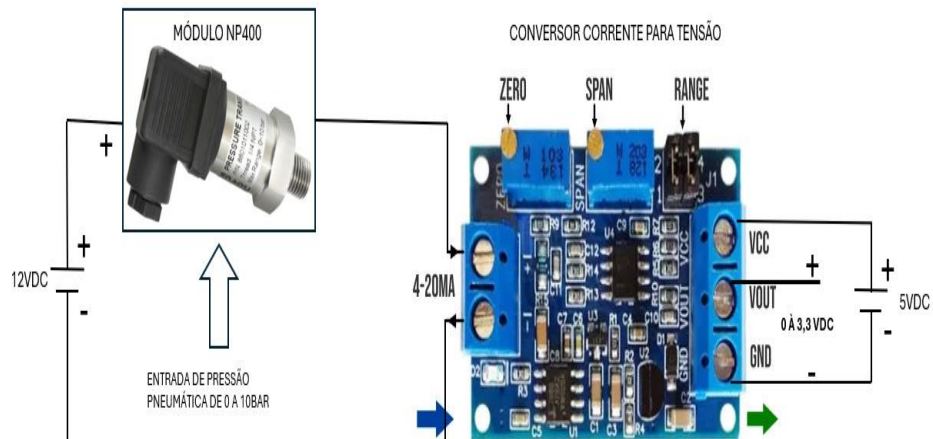
Figura 20 - Módulo conversor de corrente para tensão XY- ITOV



Fonte: página do XY-ITOV no site Robotics.org.za.

Para utilizar conversor XY-ITOV foi necessário executar um processo de configuração e calibração, antes de conectá-lo a porta analógica do ESP32. Para esta finalidade foi montado o circuito de calibração e teste conforme mostrado na figura 21.

Figura 21 - Circuito de teste e calibração XY-IOTV com NP400



Fonte: O autor (2024)

Após a montagem do circuito e com ele desenergizado, o conversor XY-IOTV foi configurado para trabalhar com a tensão de saída na faixa de 0 a 3,3VDC (configuração 2), através dos jumpers de configuração do range de tensão de saída. Na tabela 10 são apresentadas as configurações possíveis para os valores da tensão de trabalho.

Tabela 10 - Configuração da tensão de saída conversor XY-IOTV

Configuração	Range de tensão	Conector J1 (1-2)	Conector J1 (3-4)
1	0 – 2,5VDC	OFF	ON
2	0 – 3,3VDC	OFF	OFF
3	0 – 5VDC	ON	ON
4	0 – 10VDC	ON	OFF

Fonte: Adaptado da página do XY-ITOV no site Robotics.org.za.

Após a configuração dos jumpers do conversor XY-IOTV, o circuito foi energizado e a entrada de pressão do transmissor NP400 foi conectada a um compressor de ar comprimido capaz de fornecer pressão compreendida entre 0 e 10 bar. Em seguida, foi utilizado um multímetro modelo ET-1100 DMM da Minipa (figura 22), conectado a saída do XY-IOTV para medir a tensão. Um segundo multímetro modelo ET-1002 da Minipa (figura 23), foi conectado a entrada de corrente do conversor XY-IOTV, com a finalidade de monitorar a corrente elétrica gerada pelo transmissor de pressão NP400. Para efetuar a calibração foram determinados três pontos de pressão conhecidos e o procedimento executado, conforme descrito a seguir:

0% do range de pressão do transmissor: o compressor foi regulado em 0 bar, fazendo com que o transmissor NP400 fornecesse uma saída de 4mA. Uma vez medido esse valor de corrente, foi utilizado o trimpot de ajuste de zero para colocar a saída do XY-IOT em 0VDC; 50% do range de pressão do transmissor: O compressor foi regulado em 5 bar, fazendo com que o transmissor NP400 fornecesse uma saída de 12mA. Uma vez que os valores de zero e span já se encontravam ajustados, a leitura de tensão no módulo XY-IOT foi de aproximadamente 1,64VDC. Desta forma, o ajuste da placa XY-IOT foi finalizado, e por conseguinte, 100% do range de pressão do transmissor: O compressor foi regulado em 10 bar, fazendo com que o transmissor NP400 fornecesse uma saída de 20mA. Uma vez medido esse valor de corrente, foi utilizado o trimpot de ajuste de span para colocar a saída do XY-IOT em um valor aproximado de 3,3VDC, ficando os valores finais de calibração conforme demonstrados na tabela 11.

Tabela 11 - Valores de calibração do conversor XY-IOTV

Pontos de calibração	Pressão gerada no compressor	Corrente na saída do NP 400	Tensão de saída
1	0 bar	4mA	0 VDC
2	5 bar	12mA	1,64 VDC
3	10 bar	20mA	3,28 VDC

Fonte: O autor (2024)

Figura 22 – Multímetro ET-1100 DMM



Fonte: Minipa do Brasil Ltda (2025)

Figura 23 – Multímetro ET-1002



Fonte: Minipa do Brasil Ltda (2025)

3.2.9 Sensor de temperatura

Para medir a temperatura do substrato no interior do protótipo de biodigestor experimental, foi utilizado o sensor de temperatura, modelo DS18B20 da Maxim Integrated (figura 24).

Figura 24 - Sensor de temperatura DS18B20

Fonte: (Datasheet DS18B20, 2019)

Na tabela 12 são apresentadas as principais especificações do sensor utilizado na pesquisa.

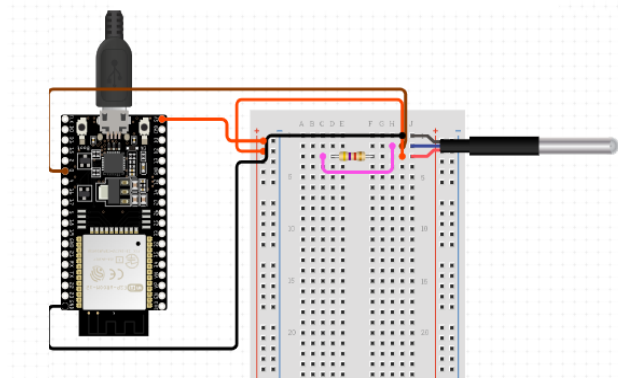
Tabela 12 - Especificações do sensor de temperatura DS18B20

Especificações do se DS18B20	
Tensão de operação	3 à 5,5VDC
Resolução de leitura	9 a 12 bits
Faixa de medição	-55°C a +125°C
Modo de comunicação	1 -Wire
Tempo de atualização	<750ms
Precisão da medição	±0,5°C

Fonte: Adaptado do datasheet do sensor DS18B20

O sensor de temperatura DS18B20, tem calibração de fábrica, apto a realizar as leituras de temperatura em tempo real. Todavia, para realizar o teste de funcionamento com o DS18B20, foi necessário executar um programa de leitura com a biblioteca de programação deste sensor, e montar a configuração de hardware conforme apresentada na figura 25. Uma vez com o circuito operacional, o sensor passou a captar valores da temperatura ambiente.

Figura 25 - Diagrama de interligação do circuito de teste DS18B20/ESP32



Fonte: O autor (2025)

3.2.10 Sensor de pH

Para obtenção da variável pH (potencial hidrogeniônico) do substrato no interior do protótipo do biodigestor experimental foi utilizado o módulo sensor de pH, modelo BNC PH4502C, composto pela placa de leitura de sinais e pelo sensor de pH, conforme figura 26.

Figura 26 - Sensor de pH



Fonte: Usinainfo (2025)

A placa eletrônica recebe os sinais vindos e captados pela sonda de pH, onde são amplificados e linearizados sendo posteriormente enviados ao microcontrolador ESP 32, codificados através de programação e disponibilizados para leitura. Este sensor fornece uma saída de tensão de 0 a 5VDC, que varia de acordo com os valores de pH compreendidos entre 0 à 14 de acordo com Usinainfo (2022). Este valor de tensão foi convertido para 0 à 3,3V.

Na tabela 13 são apresentadas as principais características do sensor BNC PH4502C.

Tabela 13 - Especificações do sensor BNC PH4502C

Especificações do conversor BNC PH4502C	
Tensão de operação	5,0 VDC
Corrente de trabalho	5 à 10mA
Faixa de medição	pH 0 à 14
Tempo de resposta	5 segundos
Temperatura de trabalho	10°C à 50°C

Fonte: Adaptado de Usinainfo (2022)

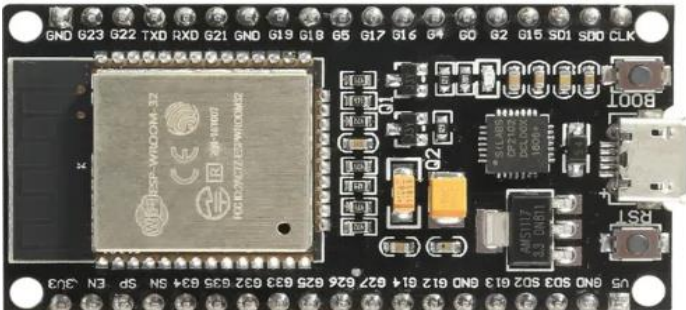
3.3 Modelagem do controlador (3ª etapa)

A modelagem do controlador foi elaborada em duas partes, a modelagem do hardware e a modelagem do software e posteriormente integradas conforme abordado a seguir nos itens 3.3.1 e 3.3.3.

3.3.1 Modelagem do controlador - Hardware

Para leitura e monitoramento dos sensores no protótipo do biodigestor foi utilizado o microcontrolador ESP32 WROOM 32, desenvolvido pela empresa Espressif Systems (figura 27). Para este trabalho a escolha deste modelo se deu em função de algumas vantagens oferecidas pela plataforma, como: baixo custo, fácil aquisição, facilidade de programação e diversas possibilidades de comunicação embarcadas, além de atender a diversas aplicações de mercado que vão desde redes de sensores de baixo consumo até sistemas de codificação de voz.

Figura 27 - Microcontrolador ESP32 WROOM 32



Fonte: Smart Kits (2025b)

O ESP32 WROOM 32 vem com comunicação Wi-Fi, Bluetooth e Bluetooth LE nativas, o que possibilita a sua utilização em aplicações de IoT (Internet das Coisas). Incorporado neste

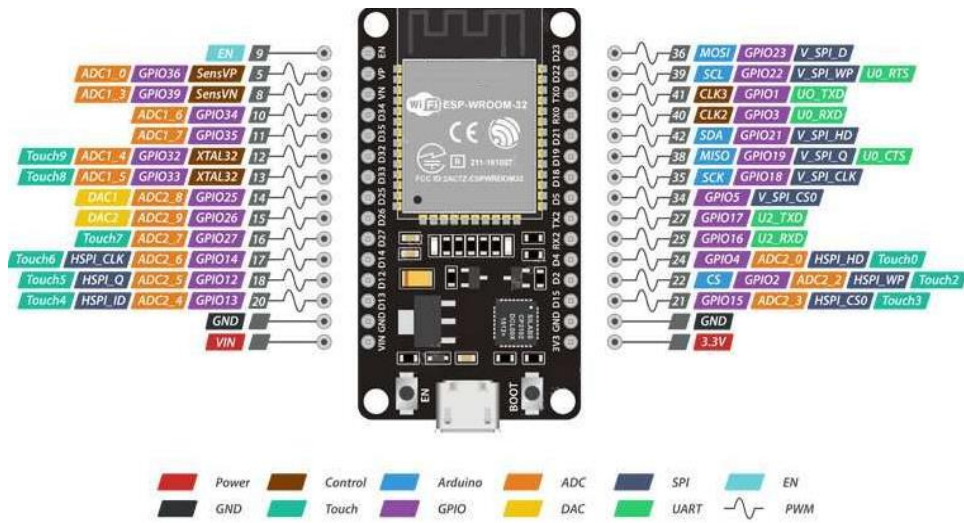
módulo está o chip ESP32-D0WDQ6, que possui dois núcleos de CPU que podem ser controlados individualmente com uma frequência ajustável de 80 a 240MHz. Possui um coprocessador de baixo consumo que pode ser utilizado em substituição a CPU para executar tarefas que não exigem muito processamento (Espressif Systems, 2025). Na tabela 14 são apresentadas algumas características principais do ESP32 e na figura 28 é apresentado a sua pinagem.

Tabela 14 - Especificações do ESP32 WROOM 32

Especificações do ESP32 WROOM 32	
Tensão de operação	2,7 à 3,3 VDC
Nível lógico de operação	3,3 VDC
Entradas e saída digitais	Até 34
Resolução da entrada analógica	12 bits ADC
Interfaces periféricas	I ² C, SPI, UART, I ² S, PWM

Fonte: Adaptado Smart Kits (2025b)

Figura 28 - Diagrama dos pinos ESP32 WROOM 32



Fonte: Smart Kits (2025a)

Neste trabalho os sensores utilizados para medir metano (MQ-4), dióxido de carbono (MQ-135), gás sulfídrico (MQ-136), pressão (NP-400) e o pH (PH4502C) foram conectados aos GPIO ADC (Analog Digital Converter), isso porque o ADC é um tipo de circuito capaz de converter uma grandeza analógica, que neste trabalho representa uma tensão que vai de 0 a 3,3VDC em um valor digital. Enquanto o ESP32 WROOM 32 possui 2 conversores analógico/digitais em sua estrutura interna, sendo que o ADC1 possui 6 canais e o ADC2 9 canais. Todos os canais dos conversores analógico/digitais deste dispositivo possuem uma

resolução de 12 bits, o que permite a leitura de 4096 valores distintos dentro da faixa desejada. O sensor de temperatura não utiliza o conversor ADC já que envia os dados em formato digital.

3.3.2 Placa base para suporte do ESP32 WROOM 32

Para garantir melhor confiabilidade e flexibilidade na conexão entre os sensores e o ESP32 WROOM 32 (ESP32-DevKit V1), foi escolhida para este estudo uma base com bornes parafusáveis, expansão de entradas e saídas e regulagem de tensão denominada ESP32 base board, desenvolvida pela empresa Autocore Robótica. Esse tipo de placa, possibilitou a eliminação de mal contato entre o ESP32 WROOM 32 e seus periféricos, uma vez que possui um socket de 30 pinos para encaixe do módulo do ESP32, que possui conexão elétrica com os bornes parafusáveis, que recebem as conexões elétricas provenientes dos sensores. A base também possui a capacidade de alimentação de fontes externas e baterias simultaneamente trabalhando com tensões entre 9 e 12V (Autocore Robótica, 2025). Na figura 29 é mostrada a placa base ESP32.

Figura 29 - Placa base ESP32



Fonte: Autocore Robótica (2025)

3.3.3 Modelagem do controlador – Software

O programa utilizado pelo microcontrolador ESP32 foi desenvolvido em linguagem C++ que teve como finalidade principal o gerenciamento do sistema de monitoramento do biodigestor por meio da execução de diversas tarefas, dentre as quais podemos destacar:

- Aquisição dos valores de leitura brutas dos sensores de gases, pH, pressão e temperatura, feitas de forma sequencial.

- Conversão dos valores brutos em grandezas físicas (ex: ° C para temperatura e ppm para gases).

- Conexão com a rede Wi-Fi e envio dos dados processados para o ThingSpeak através das requisições HTTP em dois canais distintos.

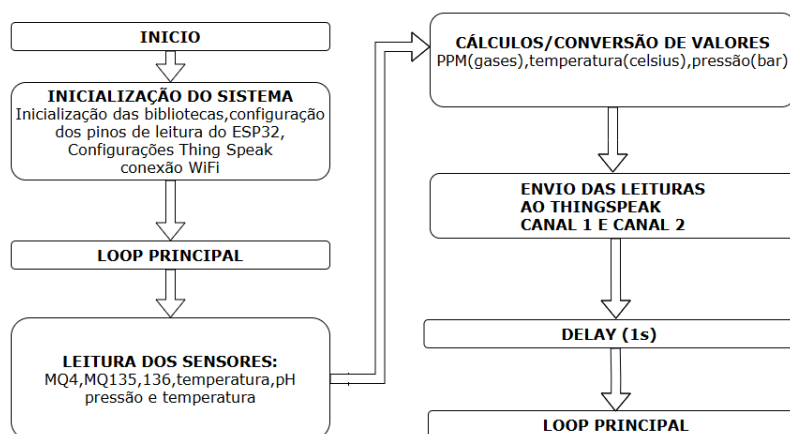
O programa foi desenvolvido para ser executado de forma cíclica, permitindo o monitoramento contínuo e em tempo real das variáveis monitoradas. O fluxo de operação com as principais tarefas é detalhado conforme a seguir:

- Inicialização do sistema: inicialização das bibliotecas, configuração dos pinos de leitura, conexão à rede WiFi através das credenciais pré-configuradas (ssid e password).

- Leitura dos valores de tensão analógica dos sensores: Os valores analógicos de 0 a 3,3V são lidos através e tratados através da rotina de conversão de cada sensor.

- Envio dos valores convertidos para leitura e apresentação no ThingSpeak: os valores das leituras são enviados através das requisições HTTP para leitura e apresentação no ThingSpeak através de seus respectivos canais. O código completo e comentado encontra-se no apêndice A, deste documento e na figura 30 é apresentado o diagrama de processos que permite a representação simplificada do fluxo de operação do programa.

Figura 30 – Fluxo de leitura de dados 1



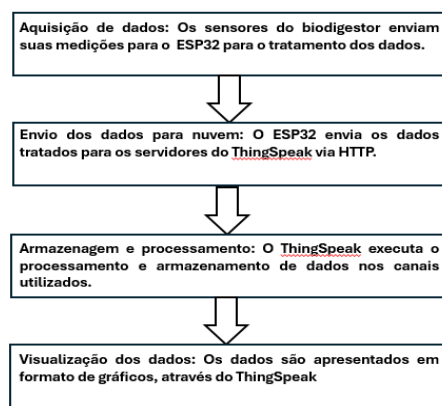
Fonte: O autor (2024)

3.4 Modelagem da interface de monitoramento via web (4ª etapa)

Nesta etapa foi implementada a infraestrutura responsável pelo monitoramento e visualização das leituras enviadas pelos sensores do biodigestor ao controlador ESP32. A implementação desta infraestrutura permitiu que os dados do sistema de biodigestão estivessem

acessíveis em tempo real através da internet, sendo acessados de forma remota. Para implementação e utilização destas funcionalidades optou-se por se utilizar a plataforma ThingSpeak. O ThingSpeak fornece diversas funcionalidades utilizadas em projetos de IoT permitindo visualizar e analisar dados oriundos de diversos dispositivos, em formato de gráficos em tempo real via protocolo HTTP ou MQTT e que são armazenados em nuvem (Mathworks, 2025). Para garantir o correto funcionamento da interface web, foi estruturado o fluxo de dados apresentado na figura 31.

Figura 31 – Fluxo de leitura de dados 2



Fonte: Adaptado MathWorks (2025)

3.4.1 Utilização da plataforma ThingSpeak

Para a utilização do ThingSpeak, deve-se fazer uma inscrição para permitir o acesso na plataforma e posteriormente a criação dos canais necessários ao projeto. Com os canais criados é possível o envio de dados do dispositivo para os canais para serem processados pelo ThingSpeak e apresentados em forma de gráficos personalizados (Mathworks, 2025).

3.4.2 Criando um canal ThingSpeak

A primeira etapa para se utilizar o ThingSpeak é realizar um cadastro, criando uma conta no site da plataforma, conforme apresentado na figura 32.

Figura 32 – Tela de cadastro no ThingSpeak

The image shows the 'Create MathWorks Account' registration form on the left and a diagram of the ThingSpeak architecture on the right.

Registration Form:

- Create MathWorks Account**
- Email Address:** A text input field.
- Location:** A dropdown menu showing 'United States'.
- First Name:** A text input field.
- Last Name:** A text input field.
- Continue:** A blue button at the bottom.

Diagram:

- SMART CONNECTED DEVICES:** Represented by icons of various devices (phone, tablet, laptop, etc.) connected to a central router.
- DATA AGGREGATION AND ANALYTICS ThingSpeak:** A cloud icon containing a database symbol.
- MATLAB:** Represented by a computer monitor showing a bar chart.
- ALGORITHM DEVELOPMENT SENSOR ANALYTICS:** Text below the MATLAB monitor.
- Arrows:** Indicate data flow from devices to the cloud, and from the cloud to MATLAB.

Fonte: Mathworks (2025)

Para acessar os canais na plataforma ThingSpeak é necessário efetuar o login com as credenciais cadastradas, que são o e-mail e a senha, conforme apresentado na figura 33.

Figura 33 – Tela de acesso ao ThingSpeak

The image shows the login page of the ThingSpeak platform. At the top, there is a navigation bar with the ThingSpeak logo and links for 'Canais', 'Apps', and 'Apoio'. Below the navigation bar, the MathWorks logo is displayed on the left. The main content area contains the login form:

- Email:** A text input field.
- Password:** A text input field.
- Buttons:** 'Next' and 'Sign In' buttons.
- Links:** 'No account? Create one!' and 'Forgot Password?' links.

Fonte: Mathworks (2025)

Com o usuário logado na plataforma, a etapa seguinte foi a criação do canal. Para criar um canal, deve-se clicar na aba denominada “Canais” e em seguida em “Novo canal”. O nome do canal e seus campos devem ser configurados conforme figura 34.

Figura 34 – Tela de apresentação de um novo canal

Nome

Descrição

Campo 1

Field Label 1

☒

Campo 2

☐

Campo 3

☐

Campo 4

☐

Campo 5

☐

Campo 6

☐

Campo 7

☐

Campo 8

☐

Os canais armazenam todos os dados que um aplicativo ThingSpeak coleta. Cada canal inclui oito campos que podem conter qualquer tipo de dados, além de três campos para dados de localização e um para dados de status. Depois de coletar dados em um canal, você pode usar os aplicativos ThingSpeak para analisá-los e visualizá-los.

Configurações do canal

• **Porcentagem concluída:** Calculado com base nos dados inseridos nos vários campos de um canal. Insira o nome, a descrição, o local, o URL, o vídeo e as tags para concluir seu canal.

• **Nome do canal:** Insira um nome exclusivo para o canal ThingSpeak.

• **Descrição:** Insira uma descrição do canal ThingSpeak.

• **Campo:** Marque a caixa para ativar o campo e insira um nome de campo. Cada canal ThingSpeak pode ter até 8 campos.

• **Metadados:** Insira informações sobre dados do canal, incluindo dados JSON, XML ou CSV.

• **Tags:** Insira palavras-chave que identifiquem o canal. Separe as tags com vírgulas.

• **Link para o site externo:** Se você tiver um site que contenha informações sobre seu canal ThingSpeak, especifique o URL.

• **Mostrar localização do canal:**

◦ **Latitude:** Especifique a posição da latitude em graus decimais.

Fonte: Mathworks (2025)

Cada canal disponibiliza até oito campos, cada campo corresponde a leitura de um sensor. Para este estudo foram criados dois canais, um deles exclusivo para leitura dos gases metano (CH₄); sulfídrico (H₂S) e dióxido de carbono (CO₂), denominados de PPM4, PPM136 e PPM135.O outro canal foi criado para leitura dos sensores de temperatura, pH e pressão conforme apresentada na figura 35.

Figura 35 – Tela com os canais de leitura 01 e 02 criados

Meus canais

Novo canal

Pesquisar por tag

Nome	Criado	Atualizado
Canal-01--PPM4, PPM135 e PPM136 Privado Público Configurações Compartilhamento Chaves de API Importação / Exportação de Dados	2024-10-25	2025-01-29 14:02
Canal-02-- Temperatura, Pressão e pH Privado Público Configurações Compartilhamento Chaves de API Importação / Exportação de Dados	2024-10-25	2025-01-29 14:02

Fonte Autor (2025)

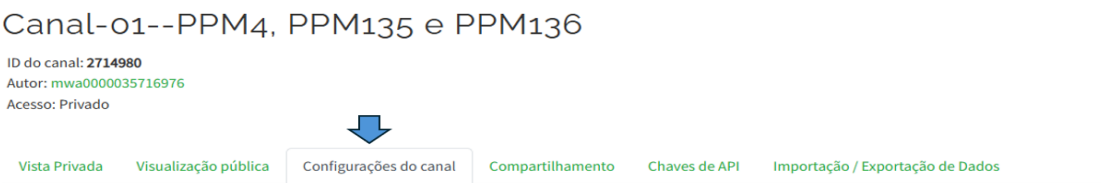
3.4.3 Configurando os canais de leitura dos sensores no ThingSpeak

Nesta etapa foram preenchidos os campos com os parâmetros necessários para que o ThingSpeak possa fazer a amostragem das leituras dos sensores de forma adequada. Para o canal 1(PPM4, PPM135 e PPM136) foram preenchidos os seguintes campos:

3.4.3.1 Aba Configurações do Canal

Nesta aba apresentada na figura 36, foram preenchidos alguns parâmetros dos sensores que serão lidos por intermédio deste canal.

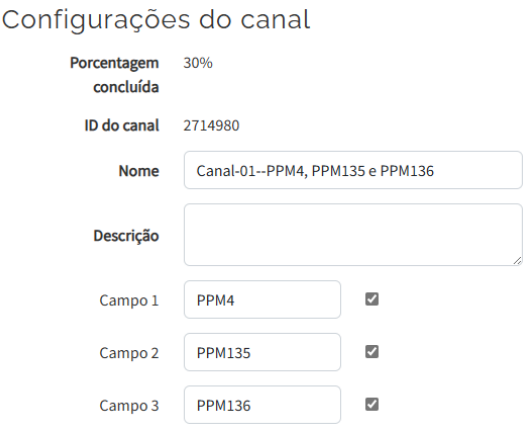
Figura 36 – Tela de leitura canal 01



Fonte Autor (2025)

Ao acessar esta aba, foram preenchidos o nome do canal e o nome do campo relacionado a cada sensor em específico, conforme apresentado na figura 37. Outros campos que não foram mostrados ou preenchidos não tiveram relevância para o funcionamento desta pesquisa.

Figura 37 – Tela configurações do canal

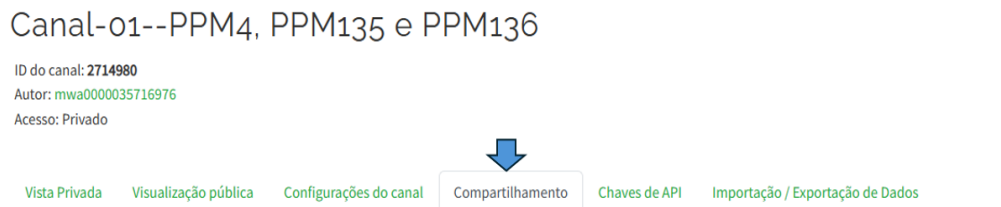


Fonte: Autor (2025)

3.4.3.2 Aba Compartilhamento

Nesta aba apresentada na figura 38, foi configurada a permissão de acesso para poder visualizar os dados do canal. Para este trabalho foi configurada a permissão de acesso com visualização privada, acesso com login e senha previamente configurados, conforme mencionado anteriormente. Existe ainda a opção de compartilhar os dados publicamente com qualquer pessoa que navegue o site do ThingSpeak ou de compartilhar com usuários específicos.

Figura 38 – Tela aba compartilhamento

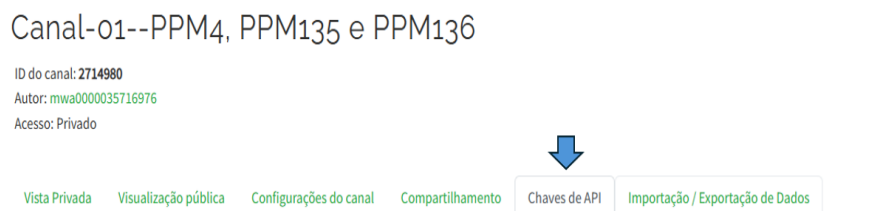


Fonte Autor (2025)

3.4.3.3 Aba Chaves de API

Nesta aba apresentada na figura 39, foram obtidas as chaves de API (*Application Programming Interface*) que permitem leitura e escrita de forma automatizada dos dados de um canal de um conjunto de regras e comandos que possibilita a comunicação entre dispositivos e a plataforma.

Figura 39 – Tela chaves de API



Fonte Autor (2025)

As API's geradas automaticamente para o canal 1 e canal 2 são mostradas na figura 40.

Figura 40 – Tela valores das chaves de API no ThingSpeak

Fonte O autor (2025)

Os valores das chaves API's foram copiadas para o código fonte escrito para o ESP32 com a finalidade de informar ao programa quais as chaves de API serão utilizadas para enviar dados e juntamente com a variável *String server = "http://api.thingspeak.com";* compor a estrutura utilizada para montar e enviar a requisição HTTP ao servidor do ThingSpeak. O trecho do código com essa estrutura é mostrado na figura 41. O código completo desenvolvido para este trabalho encontra-se disponível no apêndice A.

Figura 41 – Tela valores das chaves de API no código fonte

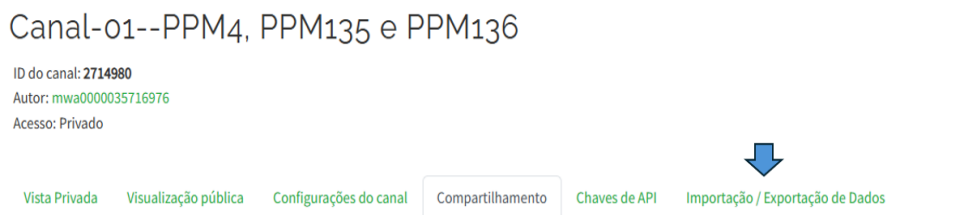
```
String server = "http://api.thingspeak.com";
String apiKey1 = "BN0L1G09J6BYB08G"; // Coloque a API Key do Canal 1
String apiKey2 = "P4IBU07G05XJEIBQ"; // Coloque a API Key do Canal 2
```

Fonte: O autor (2025)

3.4.3.4 Aba Importação/Exportação de dados

Nesta aba apresentada na figura 42, foi possível ter acesso a um arquivo em formato CSV (*Comma-Separated Values*) no qual ficaram armazenados todos os dados coletados dos sensores durante todo o período de operação do biodigestor. Esta ferramenta funcionou como um banco de dados de séries temporais (*Time Series Database - TSDB*) disponível para consulta e análise dos dados coletados em modo off-line.

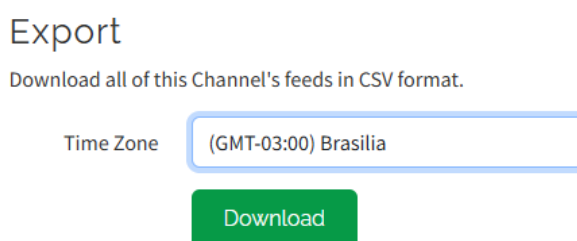
Figura 42 – Tela Importação/Exportação de dados



Fonte: O autor (2025)

Na figura 43 é mostrado o campo onde foi realizado o download do arquivo CSV.

Figura 43 – Tela Importação/Exportação de dados



Fonte: O autor (2025)

3.5 Ensaio de biodigestão anaeróbia (5ª etapa)

Nesta etapa foi conduzido o ensaio do monitoramento do processo de biodigestão. O ensaio foi realizado na cidade de São Luís, estado do Maranhão, nas coordenadas de latitude (-2.5513187), longitude (-44.2366437) e elevação de 36,16m. No município de São Luís a temperatura varia entre 25° C à 32° C e umidade relativa do ar em média de 84%. A realização do ensaio experimental compreendeu o período entre 14/12/2024 e 25/01/2025.

Para a realização do ensaio experimental foram utilizados os protótipos da câmara, do gasômetro e do painel, compostos pelos seguintes elementos:

Câmara/reator anaeróbico: constituído de uma bombona de polietileno de alta densidade e peso molecular e alta densidade (PEAD), com dimensões de 280 x 380 mm (largura x altura), cor azul, com tampa removível fixada através de trava e com capacidade de 20 litros, onde foram instalados sensores, conexões e válvulas para permitir a sua operação, conforme figura 44.

Figura 44 – Câmara do biodigestor



Fonte: O autor (2025)

Gasômetro: confeccionado utilizando tubos de PVC com diâmetro de 100mm e com comprimento de 330mm vedados, possuindo uma capacidade volumétrica aproximada de 2,59 litros e interligado a câmara de biodigestão através de mangueiras pneumáticas. No gasômetro ficaram instalados os sensores de gases e pressão, conforme figura 45.

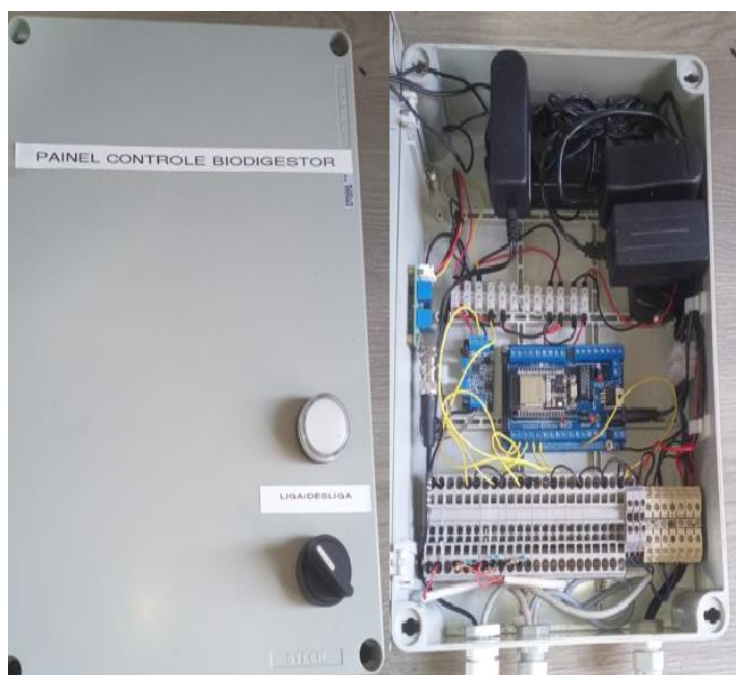
Figura 45 – Gasômetro



Fonte: O autor (2025)

Painel de Monitoramento: responsável por embarcar o microcontrolador, fontes de alimentação e interfaces dos sensores eletrônicos, possuindo dimensões de 300 x 220 x 120 mm (comprimento x largura x altura) alimentado com uma fonte primária de energia elétrica de 220VAC, conforme figura 46.

Figura 46 – Painel de monitoramento



Fonte: O autor (2025)

O substrato utilizado no abastecimento do biodigestor foi preparado utilizando uma mistura de 6L água potável e 6kg esterco bovino fresco, utilizando a proporção de 1:1. A água foi obtida através de um poço artesiano e o esterco foi proveniente de um criadouro do município de São Luís, Maranhão. A mistura de água e esterco foi homogeneizada para criar um processo fermentativo mais otimizado (figura 47). A câmara do biodigestor foi preenchida aproximadamente 50% de sua capacidade nominal, deixando espaço suficiente para a formação do biogás.

Figura 47 – Homogeneização da biomassa

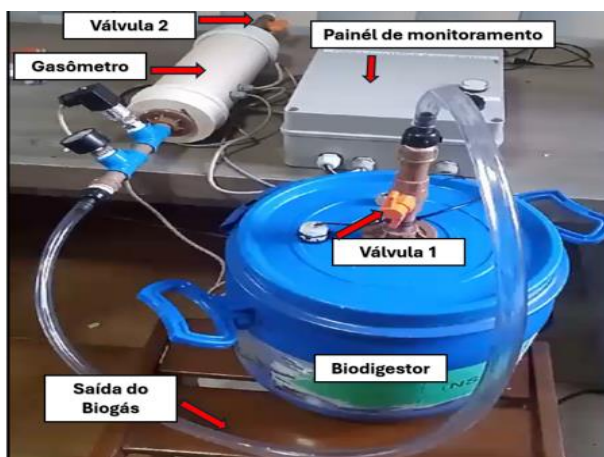


Fonte: O autor (2025)

O processo de monitoramentos das variáveis físico-químicas, através dos seus respectivos sensores (temperatura, pressão, pH, gases metano, dióxido de carbono e gás sulfídrico) foram monitorados remotamente com uso do software ThingSpeak e do aplicativo ThingView, onde os dados ficaram disponibilizados em tempo real.

Inicialmente as válvulas do biodigestor e do gasômetro encontravam-se fechadas para minimizar a entrada de ar no sistema. Imediatamente após a energização do sistema o painel de controle foi conectado à rede WiFi, sendo a válvula de controle do biodigestor aberta em seguida e as variáveis monitoradas já apresentaram as suas respectivas leituras através do software de monitoramento através de gráficos. As coletas de leituras válidas para o experimento começaram a ser computadas a partir do dia 14/12/2024, onde o período anterior a esta data foi utilizado para verificação e correção de possíveis vazamentos na estrutura física do biodigestor. A figura 48 mostra o sistema completo, com o biodigestor e gasômetro conectados ao módulo de monitoramento.

Figura 48 – Sistema de monitoramento do biodigestor



Fonte: O autor (2025)

Para a análise dos dados obtidos, foi aplicada a estatística descritiva utilizando-se o software estatístico SISVAR versão 5.6 (Ferreira, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com implementação do sistema de monitoramento remoto do protótipo de biodigestão, analisando seu desempenho e funcionamento durante os testes realizados.

4.1 Protótipo do sistema biodigestor monitorados remotamente

O protótipo do biodigestor apresentou um desempenho satisfatório durante o período de operação, uma vez que conseguiu monitorar remotamente e de forma ininterrupta as variáveis de referência durante o processo de biodigestão anaeróbia. O sistema composto por painel de controle, câmara/reator anaeróbico e gasômetro apresentaram alguns pontos a destacar como:

- Fácil integração com a rede sem fio e a plataforma de monitoramento remoto.
- Modularidade dos componentes do sistema, possibilitando uma manutenção mais simplificada.
- Boa resistência mecânica e vedação da câmara de biodigestão e do gasômetro minimizando vazamentos do biogás.

4.2 Hardware do sistema - Controlador ESP32

No ESP32 estão presentes dois conversores que são denominados de ADC1 e ADC2 com características semelhantes. Inicialmente na fase de desenvolvimento do protótipo, os sensores utilizados no presente estudo foram todos conectados as portas interligadas ao ADC2. Durante a sequência de testes iniciais foi observado um problema intermitente de congelamento da leitura dos sensores quando a comunicação Wi-Fi entre o ESP32 e a rede era estabelecida. Uma pesquisa no site do fabricante do microcontrolador apontou restrições quanto ao uso simultâneo do ADC2 e Wi-Fi, uma vez que o ADC2 compartilha recursos com o drive do módulo de comunicação sem fio. A situação foi solucionada com a utilização somente do canal ADC1 para leitura dos sensores. Apesar de estar previsto durante o desenvolvimento do trabalho, um ponto a ser destacado foi a necessidade de circuitos eletrônicos adicionais para compatibilizar os níveis dos sinais elétricos fornecidos pelos sensores com os sinais elétricos das entradas do ESP32, com exceção do sensor de temperatura. O ESP32 apresentou uma

performance satisfatória na leitura e transmissão dos dados para a nuvem, uma vez que não apresentou travamentos no hardware, no código e na comunicação com a rede sem fio.

4.3 Hardware do sistema – Sensores

Para realizar as leituras das variáveis de referência os sensores foram instalados em partes distintas do sistema do protótipo do biodigestor. Na parte interna da câmara de biodigestão foram instalados os sensores de temperatura e pH e na parte interna e externa do gasômetro foram instalados os sensores de pressão e dos gases metano, dióxido de carbono e sulfídrico. Todos os sensores foram previamente testados e ajustados antes de sua montagem no protótipo onde funcionaram de forma ininterrupta durante todo o ciclo de funcionamento do biodigestor. A performance individual de cada sensor é apresentada a seguir:

Sensor de medição de pH – PH4502C: O sensor para medição de pH no substrato apresentou um comportamento estável em suas leituras. Este tipo de sensor demandou calibração no módulo eletrônico e no software antes de ser colocado no substrato. Um outro ponto a destacar foi a limitação da distância entre o painel de monitoramento e a câmara de biodigestão em função do comprimento do cabo de conexão entre a sonda e o painel de monitoramento que é apenas de 90 cm.

Sensor de pressão – NP 400: Apresentou uma certa variação na leitura, onde conseguiu captar valores de pressão compreendidos entre 0,1 e 0,3 bar. Como este modelo de sensor foi calibrado de fábrica, houve a necessidade apenas uma rotina de programa no controlador para linearizar e amostrar a leitura do sensor. Houve a necessidade da utilização de um circuito conversor de corrente para tensão para compatibilizar o sinal de saída do mesmo com o controlador.

Sensor de temperatura – DS18B20: este sensor foi instalado na parte interna da câmara de biodigestão para medir a temperatura do substrato. Apresentou uma boa estabilidade na leitura, não havendo necessidade de calibração, uma vez que é fornecido com calibração de fábrica. Conforme já destacado anteriormente não foi necessária a utilização de circuitos para compatibilizar os sinais elétricos do mesmo com o controlador.

Sensor de gases (CO₂ – MQ 135, H₂S – MQ 136 e CH₄ – MQ 4): A utilização destes sensores apresentaram alguns fatores que devem ser considerados, tais como:

Houve a necessidade de um circuito externo para compatibilizar o sinal de saída com a entrada do controlador.

A inexistência na literatura de um procedimento padrão para realizar as calibrações necessárias para correta utilização.

Foram observadas algumas oscilações nas leituras dos valores instantâneos que podem estar relacionadas com uma característica deste sensor que é a baixa seletividade com relação a detecção do gás de interesse. Uma vez que esses sensores utilizam o dióxido de estanho (SnO_2), que é um material que reage a diversos tipos de gases, eles podem vir a detectar outros compostos diferentes do gás alvo, ocasionando algumas oscilações.

Outro fator que foi observado com relação a este tipo de sensor foi a ausência de rastreabilidade deste produto, o que impossibilitou o acesso a informações sobre o fabricante, origem do produto, histórico do transporte, tempo e condições estocagem. Estas informações são fundamentais para um bom funcionamento do sistema, uma vez que esse tipo de sensor pode apresentar degradação do elemento sensor, composto por um filme de óxido de estanho (SnO_2), quando são armazenados por longos períodos e em condições de temperatura e umidade inadequados. Estas condições podem ocasionar uma redução na vida útil do componente e o comprometimento no desempenho operacional dele, ocasionado por falhas prematuras dos componentes.

O biodigestor entrou em operação em 14/12/2024 sendo monitorado remotamente desde referida data até o final do experimento. Em 05/01/2024 os sensores MQ135 e MQ136 apresentaram suas primeiras leituras respectivamente dos gases dióxido de carbono e gás sulfídrico, sendo que o sensor MQ4 responsável por ler a concentração de gás metano não apresentou leitura no sistema de monitoramento. Imediatamente foram realizados alguns testes, onde foi constatado a ausência de sinal elétrico proveniente do sensor MQ4 apresentando um indicativo de queima. O experimento prosseguiu até o fim do ciclo de biodigestão em 25/01/2024 com a indicação de leituras provenientes dos sensores MQ135 e MQ136 e a ausência de leitura proveniente do sensor MQ4.

Com o final do experimento, o sensor MQ4 foi retirado do gasômetro para testes em bancada, e ficou comprovada a queima do elemento sensor que é o principal componente da placa eletrônica e é responsável pela detecção do gás. Outro ponto importante a destacar é que antes da entrada em operação do biodigestor, durante a fase de pré-teste dos componentes do sistema, o sensor MQ136 teve problema semelhante ao apresentado pelo sensor MQ-4. A falha prematura dos sensores MQ4 e MQ136 evidenciou alguns problemas que podem limitar o uso dos sensores da família MQ em aplicações mais críticas. A queima precoce do sensor MQ4 durante o processo de biodigestão evidenciou uma fragilidade na robustez do sistema, que

apontou para a necessidade da implementação de mecanismos para diagnósticos de falhas de maneira automática quando for feita a utilização deste tipo de sensor.

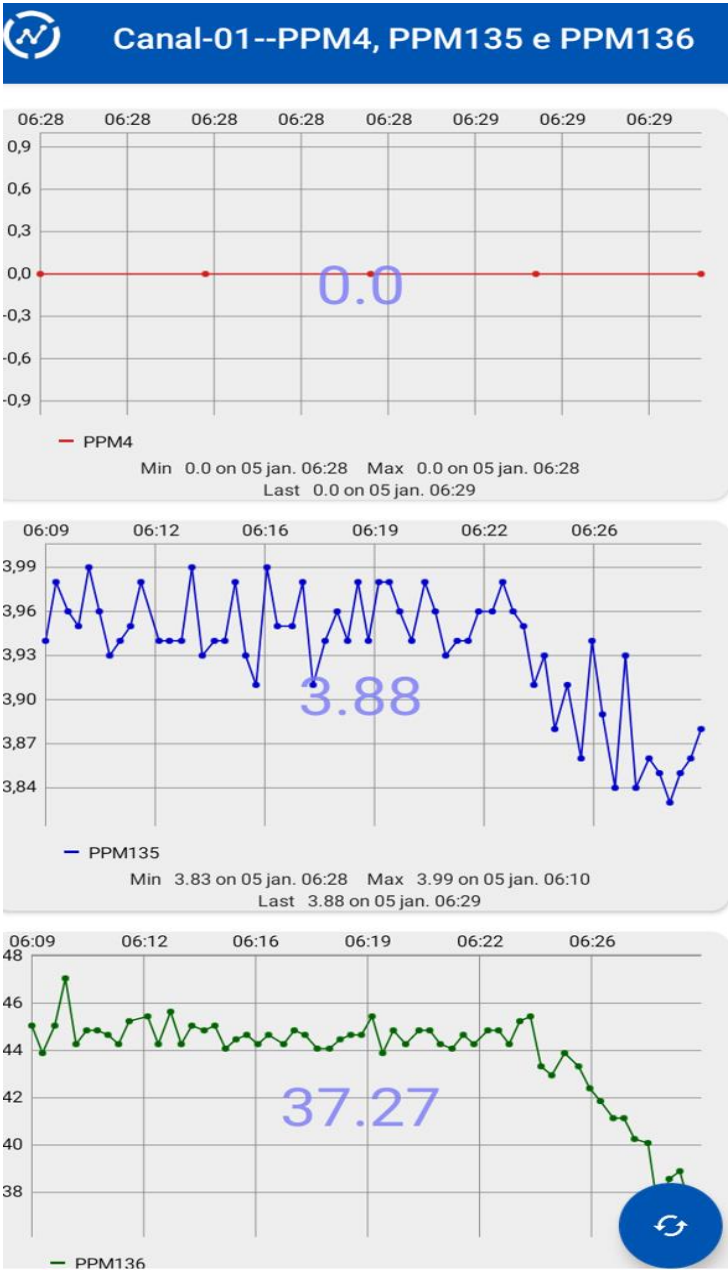
Com base nas características e resultados apresentados por este tipo de sensor neste estudo, recomenda-se cautela quanto a sua utilização em aplicações que podem ocasionar impactos nas áreas de segurança, meio ambiente ou desempenho operacional, sendo mais recomendado para o uso acadêmico. Para aplicações consideradas críticas pode ser avaliado o uso da Tecnologia de Infravermelho Não Dispersivo (NDIR). De acordo com Schaeffer (2004), os sensores que utilizam a tecnologia NDIR são consideráveis mais estáveis e seletivos em relação ao gás alvo, com vida útil e durabilidade maior que os sensores eletroquímicos.

4.4 Software de monitoramento remoto

A plataforma apresentou uma boa usabilidade permitindo ao usuário uma fácil interação com a interface gráfica, que foi realizada remotamente e em tempo real para a coleta e análise dos dados fornecidos pelos sensores durante todo o processo de biodigestão. Apresentou uma certa limitação com relação a sua responsividade, quando acessado através de dispositivos móveis, sendo essa limitação mitigada através da utilização do aplicativo ThingView que permitiu o melhorar a experiência de acesso em dispositivos móveis.

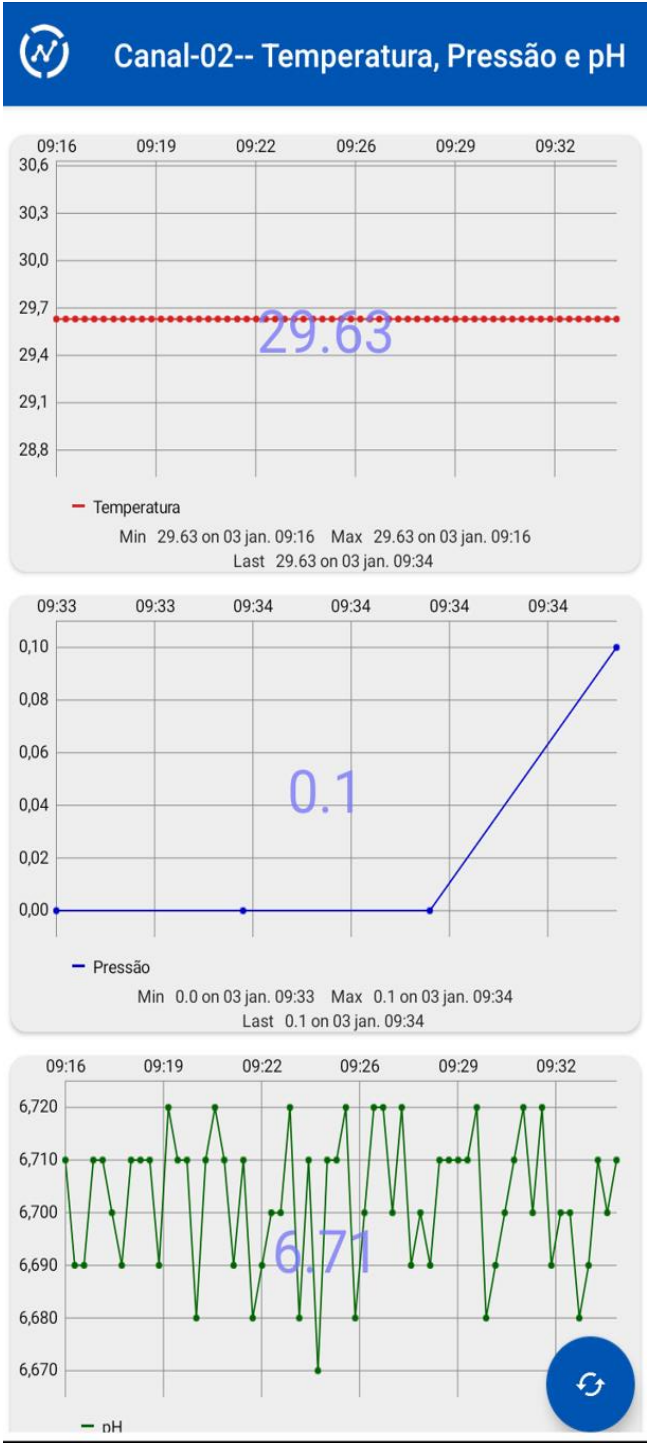
Como resultado são apresentadas, na sequência, as telas de visualização do processo, e na figura 49 é mostrada a tela com os gráficos contendo as leituras dos gases no canal 01 e na figura 50 é mostrada a tela com os gráficos contendo as leituras de temperatura, pressão e pH.

Figura 49 – Gráficos de leitura dos gases



Fonte: O autor (2025)

Figura 50 – Gráficos de leitura temperatura, pressão e pH



Fonte: O autor (2025)

4.5 Discussão das análises descritivas dos dados e suas implicações no processo de digestão anaeróbica

Os resultados da análise descritiva dos dados obtidos pelos sensores durante a realização do ensaio experimental são apresentados na tabela 15.

Tabela 15 – Resultados da análise descritiva dos dados

Parâmetros	Análise descritiva			
	Média	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Temperatura (° C)	29,43	0,14	0,38	1,29
pH	6,82	0,002	0,05	0,78
Pressão (bar)	0,014	0,003	0,05	413,65
MQ135(ppm)	0,49	1,24	1,11	225,41
MQ136 (ppm)	3,35	75,47	8,68	259,18

Analisando os resultados da análise descritiva dos dados, e correlacionando-os com o processo de digestão anaeróbica, observa-se que os valores médios das variáveis: temperatura (29,43° C), pH (6,82) e pressão (0,014), são considerados satisfatórios e encontram-se fundamentos na literatura científica.

Chernicharo (1997), descreveu que dos fatores físicos que afetam o crescimento microbiano, a temperatura é um dos mais importantes na seleção das espécies. De acordo com o autor, dois níveis ótimos têm sido associados à digestão anaeróbia, de 30 a 35° C na faixa mesófila e de 50 a 55° C na faixa termófila, sendo que a maior parte dos biodigestores tem sido projetada na faixa mesófila (20 a 45° C).

No decorrer do ensaio experimental, os valores de temperatura mantiveram estáveis, sem variações extremas, o que demonstra que o sensor de temperatura utilizado no ensaio experimental quando calibrado e utilizado de acordo com as recomendações do fabricante, assegura melhores resultados na obtenção dos dados. Pois, de acordo com Parkin e Owen (1986), é mais importante impedir a ocorrência de variações bruscas de temperatura do que operar na faixa considerada ótima, uma vez que estas oscilações afetam a população microbológica presente no reator. Nesse contexto evidencia a importância do monitoramento em tempo real nas plantas de biogás.

Quanto a variável pH, também foram observados valores que favorecem o melhor processo de biodigestão, onde o sensor funcionou de forma satisfatória, assegurando confiabilidade nos dados registrados pelos sensores e no monitoramento durante todo o ensaio experimental. Para melhor eficiência no processo de biodigestão anaeróbica, a literatura científica consultada, recomenda que o pH esteja com valor próximo a neutralidade, isso porque, em condições muito ácidas e/ou alcalina, a produção de metano decresce, podendo até mesmo cessar (Soares, 1990; Campos *et al.*, 2006).

A análise descritiva dos dados da variável pressão, obtida pelo transmissor de pressão NP 400, no interior do reator anaeróbico, também são consideradas satisfatórias. Embora tenham apresentados intervalos bastante variáveis, as faixas de leituras obtidas no ensaio experimental, demonstraram que no interior do reator anaeróbica estava operando em baixa pressão, porém dentro da normalidade, garantido o bom funcionamento do processo.

Quanto aos resultados da análise descritiva dos dados, obtidos pelos sensores MQ135 (CO₂) e MQ136 (H₂S) apresentaram uma amplitude elevada nos valores das leituras, ou seja, não ocorreram padronizações dos dados, com medidas bastante dispersas.

Abbas *et al.* (2020), já apontaram algumas dificuldades envolvidas nos sensores da série MQ, pois cada sensor tem uma curva de sensibilidade específica que descreve como ele responde a diferentes concentrações de gás. Imprecisões nas leituras de sensores da série MQ, também foram aportados por Simões *et al.* (2024), onde em suas pesquisas, relataram que alguns sensores, não conseguiram detectar o gás, mesmo sendo o sensor próprio para este tipo de detecção, e outros obtiveram leituras, porém suas curvas mostraram instabilidade com leituras não constantes ao longo do tempo. Enquanto, Araujo *et al.* (2019) e Oliveira *et al.* (2021) reportaram em seus trabalhos, súbito aumento das concentrações de CO₂ quando utilizaram sensores MQ135, fazendo o sensor perder precisão de leitura.

Sendo assim, ressalta-se a necessitando de maiores estudos para esses tipos de sensores, para melhorar suas leituras e assegurar a qualidade e segurança nos monitoramentos dos gases através das certificações dos produtos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os protótipos do biodigestor e do gasômetro experimental embarcados com controlado e módulos sensores monitorado remotamente via interface web, cumpriram sua finalidade, uma vez que, o monitoramento das variáveis (temperatura, pH, pressão, CO₂ e H₂S) foram realizadas de forma on-line, remota e ininterrupta, dispensando a necessidade de coleta local através de um operador, o que pode representar uma redução no custo no processo de coleta de amostras.

O monitoramento em tempo real do sistema permitiu a aquisição e análise dos dados de forma contínua possibilitando a intervenção no mesmo a qualquer momento melhorando a eficiência na supervisão em todo processo de digestão anaeróbica.

Ressalta-se a necessidade de calibrações e certificações de alguns tipos de sensores (MQ4, MQ135 e MQ136) para melhorar os resultados das leituras obtidas.

Para trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa, podem ser incorporados outros tipos de sensores para medição de outros gases presentes no processo de biodigestão além de diagnóstico imediato de falhas dos componentes do sistema. Também podem ser incluídos sistemas de dosagem automáticos para injeção de soluções para correção de pH, agitadores automáticos para melhorar a produção de biogás e sistemas de controle automático de temperatura. Podem ser implementadas também a utilização de algoritmos com o auxílio de inteligência artificial de modo a prever falhas e otimizar o processo de produção mediante o comportamento das variáveis medidas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Francisco Paulo Henrique de. **Monitoramento de biodigestores por sistema computacional integrado à plataforma IoT**. 2021. 189 f. Dissertação (Mestrado em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis) – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, CE, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/bitstream/123456789/2453/1/FRANCISCO%20PAULO%20HENRIQUE%20DE%20ANDRADE%20Disserta%20c3%a7%20a3o.pdf>. Acesso em 30 jan. 2025.

ABBAS, Farah Neamah; SAADOON, Intisar Mohsin; ABDALRDHA, Zainab Khyioon; ABUD, Elaf Nassir. Capable of Gas Sensor MQ-135 to Monitor the Air Quality with Arduino Uno. *International Journal of Engineering Research and Technology*, v. 13, n. 10, p. 2955-2959, 2020. DOI: 10.37624/IJERT/13.10.2020.2955-2959.

ARAUJO, Jean Marcel Milaré *et al.* Utilização de sensor mq-135 na quantificação de gás carbônico proveniente de decomposição de palhada de soja. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2019. **Anais eletrônico [...]**. Maringá, PR: UNICESUMAR, 2019. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/epcc2019/186356-utilizacao-de-sensor-mq-135-naquantificacao-de-gas-carbonico-proveniente-de-decomposicao-de-palhada-de-soja/>. Acesso em: 09 mai. 2025.

AUTOCORE ROBÓTICA. **Placa de expansão para ESP32 DevKit V1 – 30 pinos**. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/placa-de-expansao-para-esp32-devkit-v1-30-pinos>. Acesso em: 14 abr. 2025.

AZUMA, R. T. A survey of augmented reality. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, v. 6, n. 4, p. 355–385, 1997.

BLANCHET, M. et al. **Think act: Industry 4.0 – the new industrial revolution: how Europe will succeed**. Munique: Roland Berger, 2014. Disponível em: <https://www.rolandberger.com/en/Media/Industry-4.0-The-digital-world-provides-new-opportunities-for-European-industry.html>. Acesso em: 1 abr. 2025.

BOHRZ, G. I. **Geração de metano em lagoa anaeróbia: um estudo de caso em abatedouro de bovinos**. 2010. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. Disponível em: http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3281. Acesso em: 06 dez. 2024.

BRANT, A.; SUNDARAM, M. M. A novel system for cloud-based micro additive manufacturing of metal structures. **Journal of Manufacturing Processes, Additive Manufacturing**, v. 20, p. 478–484, out. 2015.

CAMPOS, Cláudio Milton Montenegro et al. Development and operation of an upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) treating liquid effluent from swine manure in laboratory scale. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 140-147, 2006.

CARRILLO-AMADO, Yersson Ramiro; CALIFA-URQUIZA, Miguel Angel; RAMÓN-VALENCIA, Jacipt Alexander. Calibration and standardization of air quality measurements using MQ sensors. **Respuestas**, v. 25, n. 1, p. 70-77, 2020.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte, MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG), 1997. 246 p.

CONTI, Fosca *et al.* Effect of mixing of waste biomass in anaerobic digesters for production of biogas. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 012011.

CUPANI, Alberto. La peculiaridad del conocimiento tecnológico. **Scientiae Studia**, v. 4, p. 353-371, 2006.

DATASHEET DS18B20, Thermometer DS18B20. “**Datasheets**”. Disponível em: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2025.

DELGADO-CASTRO, A.; ROJAS-BOLAÑOS, O. Construcción de un sistema de bajo costo para el uso y evaluación de sensores semiconductores para gases. **Educación Química**, v. 26, p. 299-306, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.07.001>. Acesso em: 20 jan. 2025.

DEGANUTTI, R. P. *et al.* **Biodigestores Rurais**: Modelo Indiano, Chinês e Batelada. Departamento de Arquitetura, Artes e Representações Gráficas, UNESP: Bauru, SP, 2002. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v1/031.pdf> Acesso em: 15 abr. 2025.

DORF, Richard C.; SVOBODA, James A. **Introdução aos circuitos elétricos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2024**: relatório síntese – ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 15 maio 2025.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP-IDF Programming Guide**. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/versions.html>. Acesso em: 10 jan. 2025.

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FILHO, I., O., S. **Avaliação da Toxicidade e Remoção de Matéria Orgânica de Efluente de Biodigestor de Resíduos Sólidos Orgânicos Tratado em Wetlands**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Pós- Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Caruaru, 2014.

FREIHE, J.; WEILAND, P.; SCHATTAUER, A. Fundamentos da Fermentação Anaeróbia. In: KALTSCHMITT, M. *et al.* **Guia Prático do Biogás**: Geração e Utilização. 5. ed. Gulzow: ed. FNR, 2010.

HANWEI. **Datasheet sensor de metano MQ-X.** Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132107/HANWEI/MQ-4.html>. Acesso em: 23 set. 2024.

HANWEI. **Datasheet sensor de metano MQ-4.** Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132107/HANWEI/MQ-4.html>. Acesso em: 23 set. 2024.

HANWEI. **Datasheet sensor de metano MQ-135.** Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132551/HANWEI/MQ-135.html>. Acesso em: 10 out. 2024.

HANWEI. **Datasheet sensor de metano MQ-136.** Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1131997/HANWEI/MQ-136.html>. Acesso em: 9 out. 2024.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: **2016 49th Hawaii International Conference On System Sciences (HICSS)**. IEEE, 5 jan. 2016.

HERMANNY; Ricardo Salles. **Codigestão anaeróbica de resíduos alimentares orgânicos e de soro de leite**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2019.

IEA – International Energy Agency. **Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Acesso em: 6 jan. 2025.

IBM. **O que é um microcontrolador?** Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/microcontroller>. Acesso em: 6 jan. 2025.

INTERFACE MQ4 Methane Gas Sensor with Arduino. Disponível em: <https://microcontrollerslab.com/mq4-methane-gas-sensor-pinout-interfacing-with-arduino-features/> Acesso em: 26 set. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2024: Analysis and forecast to 2029**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>. Acesso em: 13 maio 2025.

KAASINEN, E. et al. Smooth and resilient human–machine teamwork as an Industry 5.0 design challenge. *Sustainability*, v. 14, n. 5, p. 2773, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14052773>. Acesso em: 30 jun. 2025.

KOLBAN, Neil. **ESP32 Programming Guide**. [s.l.]: [s.n.], 2017.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; DO AMARAL, André Cestonaro. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2022.

LUGLI, Alexandre Baratella; SANTOS, Max Mauro Dias. **Redes sem fio para automação industrial**. São Paulo: Érica, 2014. p. 19-29.

MACIEL, A. P.; PARO, F.; LEITE, E. R.; LONGO, E. Dióxido de estanho nanoestruturado como sensor de NOx. **Cerâmica**, São Carlos, v. 49, p. 163-167, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132003000200009>. Acesso em: 20 jan. 2025.

MADDIKUNTA, P. K. R. et al. Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, v. 26, p. 100257, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257>. Acesso em: 20 jan. 2025.

MATHWORKS. **ThingSpeak Documentation**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/thingspeak>. Acesso em: 28 jan. 2025.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Multisim**. Disponível em: <https://www.ni.com/en/support/downloads/software-products/download.multisim.html>. Acesso em: 23 abr. 2025.

MINIPA DO BRASIL LTDA. **Multímetro Digital ET-1100B**. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/multimetros/multimetros-digitais/452-et-1100b>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MINIPA DO BRASIL LTDA. **Multímetro Digital ET-1002**. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/multimetros/multimetros-digitais/8-et-1002>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MIORANDI, Daniele; SICARI, Sabrina; DE PELLEGRINI, Francesco; CHLAMTAC, Imrich. Internet of things: Vision, applications and research challenges. **Ad Hoc Networks**, v. 10, n. 7, p. 1497–1516, 2012. DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.02.016.

MUNIZ, J.; NASCIMENTO, L. Indústria 4.0: transformação e desafios para o cenário brasileiro. **Unespiciência**, São Paulo, n. 93, 2018. Disponível em: <http://unespciencia.com.br/2018/02/01/industria-93/>. Acesso em: out. 2021.

NOVUS. **Manual do Transmissor de Pressão NP400 – v1.0x**. Disponível em: https://cdn.novusautomation.com/downloads/manual_transmissor_press%C3%A3o_np400_v10x_h_pt.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

OLIVEIRA, Jéssica Rayane Gomes de *et al.* **Proposta de modelo matemático para determinação de CO2 utilizando o sensor MQ-135**. 2021.

OLIVER, André de Paula Moniz; SOUZA NETO, Aurélio de Andrade; QUADROS, Danilo Gusmão de; VALLADARES, Renata Everett. **Manual de treinamento em biodigestão**. Versão 2.0. Salvador: Instituto Winrock Brasil, 2008. Disponível em: <https://portalidea.com.br/cursos/805d49d3d5841cbbfd06e86b73d06186.pdf> Acesso em: 10 dez. 2024.

PARKIN, Gene F.; OWEN, William F. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. **Journal of environmental engineering**, v. 112, n. 5, p. 867-920, 1986.

PRASSIDAA, G. F.; ASFARIB, U. A conceptual model for the acceptance of collaborative robots in Industry 5.0. In: *LX Information Systems International Conference*, 2021. [S.l.: s.n.].

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. Numerical Recipes In **C: The Art of Scientific Computing**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

RIOS, Artur de Almeida. **Aplicação de internet das coisas no monitoramento de corrente, tensão e temperatura em motor de indução trifásico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2044>. Acesso em: 6 fev. 2025.

ROBOTICS.ORG.ZA. XY-ITOV. Disponível em: <https://www.robotics.org.za/XY-ITOV>. Acesso em: 14 out. 2024.

RUSSELL, Stuart; NORVIG, Peter. **Inteligência artificial: uma abordagem moderna**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2022.

SADEGHI, A.-R.; WACHSMANN, C.; WAIDNER, M. Security and Privacy Challenges in Industrial Internet of Things. In: **Annual Design Automation Conference**, 52., 2015, New York. Anais [...]. New York: ACM, 2015.

SHUBEITA, Fauzi de M.; WEBBER, Thais; FERNANDES, Ramon; MARCON, César; POEHLS, Leticia B. Um estudo sobre monitoramento e controle de biodigestores de pequena escala. **Technical Report**, n. 079. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Informática, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, setembro de 2014.

SILVA, W. T. L.; NOVAES, A. P. L.; KUROKI, V.; ALMEIDA, L. F.; MAGNONI JÚNIOR, M. L. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. **Química Nova**, v. 35, n.1, p. 35-40, 2012.

SMART KITS. **ESP32 Pinout: guia básico de GPIOs**. Blog Smart Kits, 2025a. Disponível em: <https://blog.smartkits.com.br/esp32-pinout-guia-basico-de-gpios/>. Acesso em: 18 nov. 2024.

SMART KITS. **Placa ESP32 WiFi Bluetooth 38 Pinos**. 2025b. Disponível em: <https://www.smartkits.com.br/placa-esp32-wifi-bluetooth-38-pinos>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SIMÕES, Walter Charles Sousa Seiffert et al. Utilização de micro sensor para monitoramento da qualidade do ar em ambiente industrial. **Studies in Engineering and Exact Sciences**, v. 5, n. 2, p. e12039-e12039, 2024.

SOUZA, Marcos Eduardo de. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**, v. 44, n. 137, p. 88-94, 1984.

SOARES, H. M. **Digestão anaeróbia de efluentes de fábricas de cervejas e refrigerantes em reator tipo fluxo ascendente com manta de lodo (UASB)**. 1990. 253 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

SOUZA, Paulo Henrique Moura de; CAVALLARI JUNIOR, Silvio José; DELGADO NETO, Geraldo Gonçalves. Indústria 4.0: contribuições para setor produtivo moderno. In: XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – *A Engenharia de Produção e as novas tecnologias produtivas: indústria 4.0, manufatura aditiva e outras abordagens avançadas de produção*, 10-13 out. 2017, Joinville, SC. **Anais** [...]. Joinville: ENEGEP, 2017.

TORRES, Aline; PEDROSA, João Felipe; MOURA, JP de. Fundamentos de implantação de biodigestores em propriedades rurais. **Educação Ambiental em Ação**, n. 40, 2012.

UNIVERSAL ROBOTS. **Robôs autônomos**: o que são e seu uso na indústria 4.0. Disponível em: <https://www.universal-robots.com/br/blog/rob%C3%B4s-aut%C3%B4nomos-o-que-s%C3%A3o-e-seu-uso-na-ind%C3%A9stria-40/> Acesso em: 19 dez. 2024.

WU, Di; LI, Lei; ZHAO, Xiaofei; PENG, Yun; SONG, Kaixuan; ZHANG, Ruihong. An overview of process monitoring for anaerobic digestion. *Biosystems Engineering*, v. 207, p. 106-119, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.04.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511021000957>. Acesso em: 05 jan. 2025.

YEN, C.T., LIU, Y.C., LIN, C.C., *et al.* Advanced manufacturing solution to industry 4.0 trend through sensing network and cloud computing technologies. In: **2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**, pp. 1150–1152. IEEE (2014).

XU, X.; LU, Y.; VOGEL-HEUSER, B.; WANG, L. Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 61, p. 530-535, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ZEZULKA, F. *et al.* The ideas of Industry 4.0: seven years after. **IFAC PapersOnLine**, v. 55, n. 4, p. 145–150, 2022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.06.024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322003391>. Acesso em: 13 dez. 2024.

APÊNDICE

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE UTILIZADO PELO ESP32

Código fonte utilizado no ESP32, responsável pela aquisição, tratamento e envio de dados provenientes dos sensores para plataforma de monitoramento remoto.

```

1  #include <WiFi.h>
2  #include <HTTPClient.h>
3  #include <OneWire.h> // biblioteca para comunicação do sensor de temperatura
4  #include <DallasTemperature.h> //biblioteca para leitura dos valores do sensor de
    temperatura
5  //MQ4 *****
6  #define PIN_MQ4 34 // Pino analógico para o MQ-4
7  #define R0_MQ4 590 // Constante que representa RS ao ar livre// medido no
8  #define RL_MQ4 1000 // Valor atual do resistor de carga// Considerando o resistor da
    PCI// pode ser alterado
9  //MQ135 *****
10 #define PIN_MQ135 39 // Pino analógico para o MQ-135
11 #define R0_MQ135 590 // Constante que representa RS ao ar livre// medido no
12 #define RL_MQ135 1000 // Valor atual do resistor de carga// Considerando o resistor
    da PCI// pode ser alterado
13 //MQ136 *****
14 #define PIN_MQ136 35 // Pino analógico para o MQ-136
15 #define R0_MQ136 590 // Constante que representa RS ao ar livre// medido no
16 #define RL_MQ136 1000 // Valor atual do resistor de carga// Considerando o resistor
    da PCI// pode ser alterado
17 //sensor de temperatura*****
18 #define ONE_WIRE_BUS 15// Pino digital para o sensor de temperatura
19 // sensor de pressão*****
20 #define SENSOR_PRESS 33 // Pino analógico para o sensor de pressão
21 // sensor de pH*****
22 #define ph_pin 32
23

```

```
24 OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); // Prepara uma instância oneWire para
comunicar com qualquer outro dispositivo oneWire

25 DallasTemperature sensors(&oneWire); // Passa uma referência oneWire para a
biblioteca DallasTemperature

26

27 int sensorValue1 = 0; // armazena o valor vindo dos sensores de gás MQ-4
28 int sensorValue2 = 0; // armazena o valor vindo dos sensores de gás MQ-135
29 int sensorValue3 = 0; // armazena o valor vindo dos sensores de gás MQ-136
30 int press_valor = 0;
31
32 // Configurações de rede Wi-Fi
33 const char* ssid = "CLARO_SOUSA"; // Coloque o nome da sua rede Wi-Fi
34 const char* password = "@Madruga1"; // Coloque a senha da sua rede Wi-Fi
35
36 // Configurações do ThingSpeak
37
38 String server = "http://api.thingspeak.com";
39 String apiKey1 = "BN0L1G09J6BYB08G"; // Coloque a API Key do Canal 1
40 String apiKey2 = "P4IBU07GO5XJEIBQ"; // Coloque a API Key do Canal 2
41
42 void setup() {
43   Serial.begin(115200);
44   sensors.begin(); // Inicializa o sensor de temperatura
45
46   WiFi.begin(ssid, password); // Conectando à rede Wi-Fi
47   while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
48     delay(1000);
49     Serial.println("Conectando ao Wi-Fi...");
50   }
51   Serial.println("Conectado à rede Wi-Fi");
52 }
```

```

53
54 void loop()
55 {
56
57 // Rotina de leitura e conversão para PPM do sensor MQ4
58 sensorValue1 = analogRead(PIN_MQ4);
59 float v_o = sensorValue1*3.3 /4095; // Converte o valor lido sensorValue1 (0 à 4095)
para valores de tensão (0 a 3,3V)
60 float R_S4 = (3.3-v_o)* RL_MQ4 / v_o; // Formula do divisor de tensão para calcular
RS (considerando RL = 1000)
61 float PPM4 = pow(R_S4/R0_MQ4,-2.95)*1000; //
62 Serial.print("METANO: "); Serial.println(PPM4);
63 delay (1000);
64
65 //Rotina de leitura e conversão para PPM do sensor MQ135
66 sensorValue2 = analogRead(PIN_MQ135);
67 float v_1 = sensorValue2*3.3 /4095; // Converte o valor lido sensorValue1 (0 à 4095)
para valores de tensão (0 a 3,3V)
68 float R_S135 = (3.3-v_1)* RL_MQ135 / v_1; // Formula do divisor de tensão para
calcular RS (considerando RL = 1000)
69 float PPM135 = pow(R_S135/R0_MQ135,-3.10)*100; //
70 Serial.print("DIOXIDO: "); Serial.println(PPM135);
71 delay (1000);
72
73 // Rotina de leitura e conversão para PPM do sensor MQ136
74 sensorValue3 = analogRead(PIN_MQ136);
75 float v_2 = sensorValue3*3.3 /4095; // Converte o valor lido sensorValue1 (0 à 4095)
para valores de tensão (0 a 3,3V)
76 float R_S136 = (3.3-v_2)* RL_MQ136 / v_2; // Formula do divisor de tensão para
calcular RS (considerando RL = 1000)
77 float PPM136 = pow(R_S136/R0_MQ136,-4.11)*40; // VALOR PARA IR PRO
MQTT
78 Serial.print("GAS SULFIDRICO: "); Serial.println(PPM136);

```

```
79 delay (1000);
80
81 // leitura do valor do sensor de temperatura
82 sensors.requestTemperatures(); // chama a função request da biblioteca sensor de
temperatura
83 float temperature = sensors.getTempCByIndex(0); //pega a temperatura em celsius e
coloca na variavel temperature
84 Serial.print(temperature);
85 Serial.println("C");
86 delay (1000);
87
88 //leitura do sensor de pressão
89 int press_valor = analogRead (SENSOR_PRESS);
90 float pressao = map(press_valor,0,4095,0,100)/10.0;
91 Serial.print("Pressao: ");
92 Serial.print(pressao);
93 Serial.println(" bar");
94 delay (1000);
95
96 //leitura do sensor de PH
97 int measure = analogRead(ph_pin);
98 Serial.print("Measure: ");
99 Serial.print(measure);
100
101 double voltage = 3.3 * measure / 4095.0; // conversão
102 Serial.print("\tVoltage: ");
103 Serial.print(voltage, 3);
104 float Po = 7.00 + ((1.592 - voltage) / 0.60);// *x,xx* de acordo com a tensão que vai
para o controlador*** 0.60 corresponde ao step
105 Serial.print("\tPH: ");
106 Serial.print(Po, 3); //
107 Serial.println("");
```

```

108 delay(2000);
109
110 // Certifique-se de usar a classe String para as concatenações
111
112 String url1 = server + String("/update?api_key=") + apiKey1 + String("&field1=") +
String(PPM4, 2) + String("&field2=") + String(PPM135, 2) + String("&field3=") +
String(PPM136, 2);
113
114 String url2 = server + String("/update?api_key=") + apiKey2 + String("&field1=") +
String(temperature, 2) + String("&field2=") + String(pressao) + String("&field3=") +
String(Po, 2);
115
116 String("&field3=") + String(measure) + String("&field4=") + String(Po, 2);
117
118 //Enviar os dados para o ThingSpeak
119 enviarDadosThingSpeak(url1);
120 enviarDadosThingSpeak(url2);
121 delay(1000); // Atraso de 1 segundo entre as atualizações
122 }
123
124 void enviarDadosThingSpeak(String url) {
125 if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
126 HTTPClient http;
127 http.begin(url);
128 int httpCode = http.GET();
129
130 if (httpCode > 0) {
131 Serial.println("Dados enviados com sucesso. Código HTTP: " + String(httpCode));
132 } else {
133 Serial.println("Erro ao enviar os dados. Código HTTP: " + String(httpCode));
134 }
135

```

```
136 http.end();  
137 } else {  
138 Serial.println("Erro de conexão WiFi.");  
139 }  
140 }
```