



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO (PROPPG)
MESTRADO ACADÊMICO EM SOCIOBIODIVERSIDADE E
TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS (MASTS)**

FRANCISCO PAULO HENRIQUE DE ANDRADE

**MONITORAMENTO DE BIODIGESTORES POR SISTEMA COMPUTACIONAL
INTEGRADO À PLATAFORMA IOT**

REDENÇÃO, CEARÁ

2021

FRANCISCO PAULO HENRIQUE DE ANDRADE

MONITORAMENTO DE BIODIGESTORES POR SISTEMA COMPUTACIONAL
INTEGRADO À PLATAFORMA IOT

Dissertação apresentada ao Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis (MASTS) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, com a linha de pesquisa em Tecnologias e Desenvolvimento Sustentável.

Orientador: Prof. Dr. John Hebert da Silva Felix.

Coorientador: Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado Alcócer

REDENÇÃO, CEARÁ

2021

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Andrade, Francisco Paulo Henrique de.

A554m

Monitoramento de biodigestores por sistema computacional
integrado à plataforma IoT / Francisco Paulo Henrique de Andrade. -
Redenção, 2021.

189f: il.

Dissertação - Curso de Sociobiodiversidade e Tecnologias
Sustentáveis, Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e
Tecnologias Sustentáveis, Universidade da Integração Internacional
da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2021.

Orientador: Prof. Dr. John Hebert da Silva Felix.

Coorientador: Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado Alcócer.

1. Biodigestor. 2. Biogás. 3. Sistema de Monitoramento. 4.
Internet das Coisas. 5. Metano. I. Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado
Alcócer. II. Título.

CE/UF/BSCA

CDD 665.776

MONITORAMENTO DE BIODIGESTORES POR SISTEMA COMPUTACIONAL
INTEGRADO À PLATAFORMA IOT

Dissertação apresentada ao Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis (MASTS) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, com a linha de pesquisa em Tecnologias e Desenvolvimento Sustentável.

Aprovado em: 30 / 11 / 2021

Banca Examinadora

Prof. Dr. John Hebert da Silva Felix

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB
Orientador

Prof.: Dr. Juan Carlos Alvarado Alcócer

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB
Coorientador

Prof.^a: Dr.^a Olienai de Oliveira Pinto

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB
Examinadora

Prof.: Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE
Examinador

Dedico este trabalho

À Deus por permitir que eu chegasse até aqui,

Ao meu pai Edmundo Furtunato de Andrade (in memoriam) que me ensinou a ser uma pessoa correta na qual me orgulho de ter espelhado o seu altruísmo como estilo de vida.

À minha mãe Maria do Socorro Pitombeira de Andrade que sempre me apoiou incondicionalmente, no qual espelhei sua garra e persistência e com quem aprendi o que é o amor incondicional.

Aos Meus Filhos (Henrique, Herick e Lucas) que sempre foram fonte de inspiração e amor nos momentos mais difíceis dessa caminhada.

À minha esposa Maria Liduina que sempre esteve me apoiando em todos os momentos da caminhada.

À São Francisco de Assis meu santo protetor no qual sou devoto e vivifica minhas esperanças e minha fé.

À Maria mãe de Jesus que intercedeu por mim e me deu forças nos momentos de fraquezas e nas dificuldades da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Professor John Hebert da Silva Felix pela orientação de alto nível e pelo profissionalismo, dedicação e paciência que teve ao longo do desenvolvimento deste trabalho e por todo conhecimento compartilhado

Ao meu coorientador professor Juan Carlos Alvarado Alcócer no qual me proveu de ensinamentos fundamentais para minha formação científica e profissional, e teve papel fundamental na construção deste trabalho.

À professora Olienai de Oliveira Pinto pela dedicação, paciência e profissionalismo que me motivou desde sempre e ajudou com a partilha de conhecimentos essenciais que tiveram suma importância para o sucesso deste trabalho.

Ao professor Auzir Ripardo de Alexandria membro da banca de qualificação que deu grande ajuda ao enriquecimento deste trabalho compartilhando conhecimentos refinados.

A todos os professores do MASTS, que com profissionalismo, dedicação e carinho nos propiciaram condições para o desenvolvimento de um trabalho de excelência. Nos tornando profissionais e pesquisadores mais completos em todos os aspectos e como pessoa humana.

Ao meu filho Francisco Henrique Lemos Andrade que foi meu braço direito no apoio pela busca de tecnologias inovadoras colaborando para o desenvolvimento de um trabalho de excelência.

Ao programa MASTS que com sua magnífica proposta multidisciplinar de sociobiodiversidade e sustentabilidade nos torna seres humanos melhores em todos os aspectos.

Aos discentes colegas de turma do mestrado MASTS, no qual vivenciamos inesquecíveis momentos que foram fundamentais como fator motivador para concluirmos com sucesso essa caminhada.

À minha família, especialmente, minha mãe (Socorro), minha esposa (Liduína) e filhos (Henrique, Herick e Lucas) pelo apoio incondicional para concluir esse mestrado.

A todos que, direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, terão minha eterna gratidão. Obrigado.

À Deus por ter me dado Saúde e Sabedoria para conseguir concluir esse trabalho, por ter curado todas as enfermidades e dificuldades diversas ocorridas durante o mestrado, por ter me deixado viver durante uma pandemia de tamanhas proporções. Obrigado Deus.

*“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a
eletricidade e a energia atômica: **a vontade**”*
– Albert **Einstein**

RESUMO

O biodigestor tem por finalidade prover o tratamento adequado de resíduos orgânicos que seriam descartados de forma inapropriada no meio ambiente. Resíduos estes que em seu processo de decomposição são responsáveis pela liberação de gases causadores do efeito estufa, como o gás carbônico (CO_2) e o gás metano (CH_4). Na biodigestão anaeróbia, esses resíduos são transformados em formas de energia reutilizáveis como o biogás combustível e o biofertilizante. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi a construção de um sistema computacional que possibilitasse o monitoramento em tempo real dos parâmetros de grandezas físicas envolvidas no processo da biodigestão aplicados ao estudo de filtros biológicos do biogás gerado. Para o desenvolvimento deste trabalho foram construídos, utilizando materiais reciclados, quatro protótipos de biodigestores batelada, adaptados com módulos de sensores eletrônicos para coleta e envio de dados em tempo real, por meio de plataforma IoT (Internet das Coisas), ao sistema desenvolvido nesta pesquisa, denominado UNIBIO. Foram utilizadas plataformas de hardware e de software embarcado baseadas em microcontroladores de baixo custo. O Sistema foi baseado em conceitos e tecnologias englobadas pela Indústria 4.0. Os parâmetros físicos monitorados eletronicamente pelos sensores foram: concentração dos gases metano (CH_4), carbônico (CO_2) e sulfídrico (H_2S), temperaturas do biogás, da biomassa e do ambiente, umidade relativa do ar e pressão manométrica no biogás. Como resultado, o sistema apresentou os seguintes dados analíticos para os protótipos com filtros combinados numerados em P1(sem filtros), P2(água), P3(água e esponja de aço) e P4(água e palha de aço): melhor desempenho para o filtro do protótipo P3 que apresentou biogás (CH_4 66,7%, H_2S 16 ppm), seguido pelo filtro P4 (CH_4 66,1%, H_2S 18 ppm), P2 apresentou (CH_4 64,9%, H_2S 31 ppm) e por fim o referencial P1 apresentou (CH_4 60,7%, H_2S 88 ppm). Conclui-se que o sistema de monitoramento de biodigestores através da capacidade de acompanhamento de fatores em tempo real possibilita um melhor entendimento do processo de digestão anaeróbia, permitindo uma melhor análise e otimização, assim como possibilita o estudo de desempenho dos elementos envolvidos no processo como biomassa, filtros e fatores ambientais.

Palavras-Chave: Biodigestor. Biogás. Sistema de Monitoramento. IoT. Metano.

ABSTRACT

The biodigester is intended to provide adequate treatment to organic waste that would otherwise be inappropriately disposed of in the environment. These residues, in their decomposition process, are responsible for the release of gases that cause the greenhouse effect, such as carbon dioxide (CO_2) and methane gas (CH_4). In anaerobic digestion, these wastes are transformed into reusable forms of energy such as biofuel and biofertilizer. In this context, the objective of this work was the construction of a computational system that would allow the real-time monitoring of the parameters of physical quantities involved in the biodigestion process applied to the study of biological filters of the generated biogas. For the development of this work, four prototypes of batch type biodigesters were built using recycled materials, adapted with electronic sensor modules to collect and send data in real time, through the IoT (Internet of Things) platform, to the system developed in this research, called UNIBIO. Hardware and embedded software platforms based on low-cost microcontrollers were used. The system was based on concepts and technologies encompassed by Industry 4.0. The physical parameters electronically monitored by the sensors were: concentration of methane (CH_4), carbon dioxide (CO_2) and hydrogen sulphide (H_2S) gases, biogas, biomass and ambient temperatures, relative humidity and gauge pressure in the biogas. As a result, the system presented the following analytical data for the prototypes with combined filters numbered P1 (without filters), P2 (water), P3 (water and steel sponge) and P4 (water and steel wool): better performance for the prototype P3 filter that presented biogas (CH_4 66.7%, H_2S 16 ppm), followed by the filter P4 (CH_4 66.1%, H_2S 18 ppm), P2 presented (CH_4 64.9%, H_2S 31 ppm) and finally, the reference P1 presented (CH_4 60.7%, H_2S 88 ppm). It is concluded that the biodigesters monitoring system through the ability to monitor factors in real time allows a better understanding of the anaerobic digestion process, allowing a better analysis and optimization, as well as enabling the performance study of the elements involved in the process such as biomass, filters and environmental factors.

Keywords: Anaerobic digester. Biogas. Monitoring system. IoT. Methane.

LISTA DE FOTOS E FIGURAS

Figura 1 – Modelo de um biodigestor batelada.....	26
Figura 2 – Diagrama de um biodigestor de tipo de operação contínua	27
Figura 3 - Vista frontal, em corte, do biodigestor modelo Indiano.....	28
Figura 4 – Modelo de Biodigestor Chinês.....	29
Figura 5 – Modelo de Biodigestor Canadense.....	30
Figura 6 – Processo de digestão anaeróbia	32
Figura 7 – Resultado do biofertilizante	38
Figura 8 – Exemplo de Diagrama ER	52
Figura 9 – Exemplo de Banco de Dados Desnormalizado	53
Figura 10 – Exemplo de Banco de Dados Normalizado	53
Figura 11 – Modelo do Biodigestor Batelada.....	57
Figura 12 – Fotografia dos protótipos de biodigestor	58
Figura 13 – Lavagem dos garrafões.....	63
Figura 14 – Furo no garrafão, em cima.	64
Figura 15 – Furo no garrafão, em baixo.	64
Figura 16 – Todos os garrafões furados.....	65
Figura 17 – Medida do tubo de PVC	65
Figura 18 – Tubo encaixado no garrafão.....	66
Figura 19 – Válvula da saída da biomassa desmontada	67
Figura 20 – Válvula da saída de biomassa, recorte lateral	67
Figura 21 – Exemplo da Sustentação da Válvula de Saída do Biofertilizante	68
Figura 22 – Válvula de saída da biomassa montada.....	68
Figura 23 – Exemplo da Montagem das Conexões de Saída de Gás	69
Figura 24 – Processo de Construção do Suporte do Gasômetro	71
Figura 25 – Vedação da Junção do Tubo Alimentador.....	72
Figura 26 – Recorte do Elemento Filtrante	73
Figura 27 – Compartimentos de Filtros Sólidos Prontos	73
Figura 28 – Marcações dos Recortes dos Gasômetros.....	75
Figura 29 – Esquema de Montagem do Gasômetro	75
Figura 30 – Vedação dos Gasômetros	76
Figura 31 – Resultado do Biodigestor Batelada	77
Figura 32 – Modelo de conexão do módulo acoplador.....	79

Figura 33 – Fotografia da construção do módulo de sensoriamento.....	79
Figura 34 – Montagem do Módulo Sensor	82
Figura 35 – Montagem da Parte Acoplada à Câmara de Biomassa.....	83
Figura 36 – Pintura e Acabamento do Módulo Sensor de Biomassa	84
Figura 37 – Diagrama de conectividade do controlador IoT	88
Figura 38 – Diagrama de caso de uso do controlador IoT.....	89
Figura 39 – Diagrama de recursos necessários do controlador IoT	90
Figura 40 – Módulo do controlador IoT já construído	91
Figura 41 – Diagrama de Classes do Microcontrolador.....	92
Figura 42 – 1º Diagrama de Processos do Microcontrolador	93
Figura 43 – 2º Diagrama de Processos do Microcontrolador	93
Figura 44 – 3º Diagrama de Processos do Microcontrolador	94
Figura 45 – 4º Diagrama de Processos do microcontrolador	95
Figura 46 – Diagrama de interligação do Regulador de Tensão	99
Figura 47 – Interligação entre os componentes eletrônicos do controlador IoT	100
Figura 48 – Bloco Estrutural do Módulo Controlador IoT.....	101
Figura 49 - Diagrama da estrutura funcional do sistema UNIBIO.....	108
Figura 50 – Propriedades do Grafana	112
Figura 51 – Modelo ER do Banco de Dados do Sistema UNIBIO	118
Figura 52 – Disposição dos Filtros nos Biodigestores	121
Figura 53 – Fotografia dos preparativos experimento digestão anaeróbia.....	122
Figura 54 – Fotografia dos Biodigestores em Operação	124
Figura 55 – Foto do equipamento GEM5000.....	125
Figura 56 – Fotografia do módulo RTC DS3231	129
Figura 57 – Circuito típico de operação do DS3231	130
Figura 58 – Esquema de ligação do Arduino com o DS3231	130
Figura 59 – Fotografia do sensor DHT11	131
Figura 60 – Circuito de operação típica do DHT11.....	132
Figura 61 – Esquema de ligação do Arduino e do sensor DHT11.....	132
Figura 62 – Fotografia do sensor DS18B20	133
Figura 63 – Circuitos operacionais típicos do sensor DS18B20.....	134
Figura 64 – Esquema de ligação do Arduino e o sensor DS18B20.....	134
Figura 65 – Foto do sensor HR202L	135
Figura 66 – Circuito operacional típico do sensor HR202L	136

Figura 67 – Teste de estabilidade do sensor MQ-4 à longo prazo	137
Figura 68 – Circuito operacional típico do sensor MQ-4.....	138
Figura 69 – Gráfico da variação de resistência do sensor MQ-4.....	139
Figura 70 – Esquema de ligação do Arduino e do sensor MQ-4	139
Figura 71 – Parâmetros técnicos do sensor MQ-4	140
Figura 72 – Circuito operacional típico do sensor MQ-136.....	141
Figura 73 – Gráfico de alteração de resistência do sensor MQ-136.....	142
Figura 74 – Esquema de ligação do Arduino e do sensor MQ-136	142
Figura 75 – Parâmetros técnicos do sensor MQ-4	143
Figura 76 – Estrutura do sensor MH-Z19B.....	144
Figura 77 – Esquema de ligação do Arduino e do sensor MH-Z19B.....	145
Figura 78 – Pinos do sensor MH-Z19B	146
Figura 79 – Fotografia dos sensores MH-Z19B.....	146
Figura 80 – Fotografia do sensor de pressão G1/4-1.2Mpa	147
Figura 81 – Gráfico da saída do sensor de pressão	148
Figura 82 – Fotografia dos sensores de pressão utilizados no projeto UNIBIO	148
Figura 83 – Circuito de utilização dos sensores MQ	149
Figura 84 – Gráfico de Variação de Valores do Sensor MQ-4.....	151
Figura 85 – Utilização do WebPlotterDigitalizer com Gráfico do Sensor Mq-4	152
Figura 86 – Gráfico de Variação de Valores do Sensor MQ-136.....	154
Figura 87 – Utilização do WebPlotterDigitalizer com Gráfico do Sensor MQ-136 ..	156
Figura 88 – Comando de Calibragem do MH-Z19B	158
Figura 89 – Calibração dos sensores de temperatura e umidade	159
Figura 90 – Equipamento adaptado para a calibração dos sensores de pressão ..	161
Figura 91 – Fotografia do calibrador de conjunto em funcionamento.....	162
Figura 92 – Tela do aplicativo para calibragem dos sensores.....	163
Figura 93 – Modelo de referência do biodigestor utilizado por Santos (2018).....	164
Figura 94 – Resultado do biodigestor adaptado produzido para o projeto	164
Figura 95 – Fotografia da Tela do Servidor API	167
Figura 96 – Tela inicial de Login.....	168
Figura 97 – Tela de relação de projetos	168
Figura 98 – Tela de Cadastro de Projeto.....	169
Figura 99 – Tela de editar projeto.....	170
Figura 100 – Aviso de remoção de projeto	170

Figura 101 – Tela de dados do projeto	171
Figura 102 – Tela de dados do projeto, continuação.....	171
Figura 103 – Gráfico cartesiano de vários gases	172
Figura 104 – Gráficos de Gases x Tempo	172
Figura 105 –Gráfico cartesiano de temperatura x umidade x pressão	173
Figura 106 – Gráfico de evolução comparativa do gás metano.....	173
Figura 107 – Tela de monitoramento do Biodigestor	174
Figura 108 – Gráficos de Dados dos Biodigestores	177
Figura 109 – Gráfico de Dados: BIODIGESTOR 1 – Temperatura + Umidade	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Poder calórico do Biogás	35
Tabela 2 – Composição do Biogás para diferentes fontes.....	36
Tabela 3 – Valores das leituras realizadas pelo GEM5000	126
Tabela 4 – Valores de Calibragem dos Sensores MQ-4 Utilizados no Projeto	152
Tabela 5 – Valores de Calibragem para o MQ-136.....	155
Tabela 6 – Dados de calibração dos sensores de temperatura.....	159
Tabela 7 – Dados de calibração dos sensores de umidade.....	160
Tabela 8 – Dados de calibração dos sensores de pressão	161
Tabela 9 – Relatório Consolidado de Leituras Biodigestor UNIBIO	175
Tabela 10 – Dados coletados no sistema UNIBIO para o Biodigestor 1.....	178
Tabela 11 – Dados coletados no sistema UNIBIO para o Biodigestor 2.....	178
Tabela 12 – Dados coletados no sistema UNIBIO para o Biodigestor 3.....	179
Tabela 13 – Dados coletados no sistema UNIBIO para o Biodigestor 4.....	180
Tabela 14 – Resultado consolidado de todos os protótipos (biodigestor 1,2,3 e 4)	180

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Reações envolvidas no processo de digestão anaeróbia.....	34
Quadro 2 - Condições do experimento do biofertilizante	38
Quadro 3 – Componentes utilizados no biodigestor batelada	59
Quadro 4 – Tabela resumo de preço dos biodigestores	62
Quadro 5 – Materiais utilizados na construção dos módulos sensores UNIBIO.....	80
Quadro 6 – Tabela resumo de preço dos módulos sensores	81
Quadro 7 – Diagrama de ligação dos Keystones aos pinos dos sensores.....	84
Quadro 8 – Diagrama de interligação elétrica dos módulos sensores.....	85
Quadro 9 - Materiais utilizados na construção do módulo controlador IoT UNIBIO..	96
Quadro 10 – Ligação dos sensores ao módulo controlador IoT	98
Quadro 11 – Mensagens Possíveis do ESP8266.....	102
Quadro 12 – Rotas do Servidor API UNIBIO	115
Quadro 13 –Parâmetros de realização de medições.....	125
Quadro 14 – Especificações do sensor HR202L	136
Quadro 15 – Intervalos de leituras do sensor MH-Z19B.....	145
Quadro 16 – Especificações do sensor MH-Z19B.....	146
Quadro 17 – Especificações do sensor de pressão	147

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Corrente alternada
API	Interface de Programação de Aplicações
AWG	Escala americana de bitolas de fios
C	Linguagem de programação C
C++	Linguagem de programação C++
CH ₄	Gás Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CSS	Folhas de Estilo em Cascatas
DATASHEET	Folha de Especificações
DC	Corrente contínua
EPI	Equipamento de proteção individual
ER	Entidade Relacional
GEE	Gases do efeito estufa
GND	Polo negativo ou terra
GPL	Licença pública geral
GLP	Gás liquefeito de petróleo
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
HZ	Unidade de medida de frequência em Hertz
HTTP	Protocolo de transferência de hipertexto
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IoT	Internet das coisas
MER	Modelo Entidade Relacional
mW	Unidade de medida de potência em milliwatts
Ohm	Unidade de medida de resistência elétrica em ohms
ppm	Parte por milhão
ppb	Parte por bilhão
°C	Unidade de medida de temperatura em graus Celsius
L	Unidade de medida de Litros
PWM	Modulação por largura de pulso
REST	Transferência Representacional de Estado,
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados

SQL	Linguagem de Consulta Estruturada
SOAP	Protocolo Simples de Acesso a Objetos
RH	Umidade relativa do ar
RTC	Relógio de tempo real
SnO ₂	Dióxido de estanho
PET	Politereftalato de etileno
PP	Polipropileno
PC	Policarbonato
PVC	Policloreto de vinila
PU	Poliuretano
UART	Receptor/Transmissor Universal Assíncrono.
UNIBIO	Sistema de Monitoramento de Biodigestores
V	Unidade de medida de tensão em Volts
VCC	Tensão em corrente contínua
WEB	Rede mundial de computadores
WiFi	Rede de dados sem fio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Objetivo Geral.....	24
1.2 Objetivos Específicos	24
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	25
2.1 Aspectos Gerais de um Biodigestor.....	25
2.1.1 Classificação dos biodigestores	26
2.1.1.1 Biodigestor Batelada	26
2.1.1.2 Biodigestor Contínuo.....	26
2.1.2 Modelos de biodigestores.....	27
2.1.2.1 Biodigestor de Modelo Indiano	27
2.1.2.2 Biodigestor Modelo Chinês.....	28
2.1.3.3 Biodigestor Modelo Canadense	29
2.2 O papel dos biodigestores no meio ambiente e sustentabilidade	30
2.3 Digestão Anaeróbia.....	32
2.4 Biogás	35
2.5 Biofertilizantes.....	36
2.6 Indústria 4.0	39
2.7 Sistemas Embarcados	42
2.7.1 Microcontroladores	42
2.7.2 IoT (Internet of Things)	42
2.7.3 Arduino	43
2.7.4 ESP-8266	43
2.7.5 Arduino IDE e Bibliotecas.....	44
2.7.6 Linguagens C e C++	44
2.8 Infraestrutura Computacional	45
2.8.1 Nginx – Proxy Reverso.....	45
2.8.2 Node.js – Servidor Web.....	45
2.8.3 Ubuntu – Linux	46
2.9 Sistemas de Software	46
2.9.1 Arquitetura REST	46
2.9.2 Interface de Programação de Aplicações – API	48
2.9.3 Grafana	48

2.9.4 Licenças de Software	49
2.9.5 JavaScript.....	49
2.10 Banco de dados.....	50
2.10.1 Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD)	50
2.10.2 Modelo de Dados	50
2.10.2.1 <i>Modelo Relacional</i>	50
2.10.2.2 <i>Modelo Entidade Relacional (MER)</i>	51
2.10.3 Normalização de Dados	52
2.10.4 MySQL	54
3 MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1 Biodigestor Batelada.....	56
3.1.1 Modelagem do Biodigestor Batelada.....	56
3.1.2 Construção do Biodigestor Batelada	58
3.1.2.1 <i>Primeira etapa – higienização dos garrações de 20 litros</i>	62
3.1.2.2 <i>Segunda etapa – Preparação dos garrações inferiores – Câmara de Biodigestão</i>	63
3.1.2.3 <i>Terceira etapa – Construção do Compartimento de Filtro Sólido</i>	72
3.1.2.4 <i>Quarta etapa – Preparação dos Garrações Superiores – Câmara de Armazenamento de Biogás (Gasômetro)</i>	74
3.1.2.5 <i>Quinta etapa – Acabamentos</i>	76
3.2 Módulos Sensores	78
3.2.1 Modelagem dos Módulos Sensores	78
3.2.2 Construção dos Módulos Sensores.....	80
3.3 Controlador IoT	87
3.3.1 Modelagem do Controlador IoT	87
3.3.1.1 <i>Modelagem do Hardware</i>	89
3.3.1.2 <i>Modelagem do Software Embarcado</i>	91
3.3.2 Construção do Controlador IoT	95
3.3.2.1 <i>Construção do Hardware Controlador IoT</i>	96
3.3.2.2 <i>Construção do Software Embarcado</i>	101
3.4 Sistema UNIBIO	108
3.4.1 Infraestrutura Computacional	109
3.4.1.2 <i>Sistema Servidor</i>	110
3.4.1.1 <i>Node.js</i>	110

3.4.1.2 MySQL	110
3.4.1.2 PM2	111
3.4.1.5 Grafana	111
3.4.1.6 Nginx	112
3.4.1.7 UFW	114
3.4.1.8 UNIBIO	114
3.4.2 Sistema Servidor Web.....	114
3.4.3 Aplicativo Cliente Web.....	116
3.4.4 Banco de Dados do Sistema UNIBIO.....	117
3.5 Experimento de Biodigestão	119
3.5.1 Localização do Experimento	119
3.5.2 Definição do Experimento: Processo de Biodigestão	119
3.5.3 Realização Experimento Biodigestão	121
3.5.4 Medição Analisador de Gás GEM5000	125
3.6 Sensores	128
3.6.1 Sensores de Temperatura e Umidade.....	128
3.6.1.1 DS3231 – Sensor digital de temperatura do módulo RTC.....	128
3.6.1.2 DHT11 – Sensor digital de temperatura e umidade	130
3.6.1.3 DS18B20 – Sensor digital de temperatura	133
3.6.1.4 HR202L – Sensor higrômetro.....	135
3.6.2 Sensores de Concentração de Gases.....	136
3.6.2.1 MQ-4 – Sensor analógico de gás metano	136
3.6.2.2 MQ-136 – Sensor analógico de gás sulfídrico.....	140
3.6.2.3 MH-Z19B – Sensor infravermelho de gás carbônico.....	143
3.6.3 G1/4-1.2Mpa – Sensor de Pressão	147
3.6.4 Calibração dos Sensores	149
3.6.4.1 Calibração do MQ-4 e MQ-136	149
3.6.4.2 Calibração do MH-Z19B.....	158
3.6.4.3 Calibração do DHT11 e DS18B20.....	158
3.6.4.4 Calibração do sensor de pressão.....	160
3.6.4.5 Calibrador de Conjunto.....	162
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	164
4.1 Protótipos de Biodigestores Batelada.....	164
4.2 Hardware de Monitoramento	165

4.3 Softwares de Monitoramento	166
4.4 Biodigestão Anaeróbia	174
4.5 Desempenho dos Filtros e Análise de Dados	176
5. CONCLUSÕES	183
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	185

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a bovinocultura e a suinocultura estão entre as atividades agropecuárias responsáveis por grande parte das emissões de gases de efeito estufa (GEEs), tornando-se necessário que sejam adotadas medidas para mitigar essas emissões. Destaca-se como uma das principais estratégias, a construção de biodigestores anaeróbios para que haja o tratamento adequado dos dejetos gerados nessas propriedades. A adoção desse método mostra que os níveis de emissão desses gases podem ser reduzidos (GARCIA JUNIOR, PIRES e DA CUNHA *et al.*, 2016; ALCÓCER *et al.* 2019).

O principal método de produção do biogás é a decomposição ocorrida no material orgânico na ausência de oxigênio, conhecida como digestão anaeróbica. Os micro-organismos digerem a matéria-prima em um reator controlado, no qual o biogás é produzido com a concentração de 50% a 70% de metano. Ademais, isto pode ser melhorado por vários métodos, um deles é a filtração por membrana, resultando em uma elevação da percentagem de concentração do gás metano o que melhora seu potencial energético na combustão (BNDES, 2018).

O biofertilizante consiste em um resíduo obtido através do processo de biodigestão, que pode ser diluído em água para ser usado diretamente nas lavouras através da fertirrigação ou após passar por um processo de secagem, sendo considerada como adubo de alta qualidade na agricultura (MILANEZ *et al.*, 2018).

Monitoramento e controle são estratégias de suma importância para se alcançar uma estabilidade adequada e maior eficiência no processo de digestão anaeróbia. O monitoramento é um requisito fundamental para que se tenha um melhor controle do processo, em que a falta de indicadores adequados pode resultar em perdas na eficiência do processo de biodigestão. Um indicador ideal tende a refletir no estado do processo e deve ser de fácil acesso e de simples utilização, parâmetros como variação de temperatura entre outros são considerados valiosos na tomada de decisões, visando sempre manter o funcionamento do processo em equilíbrio (BOE *et al.*, 2010).

No campo de utilização de biodigestores existem vários estudos e pesquisas, regionalmente no maciço de Baturité sobre essa temática, assim como têm-se vários casos de sucesso na construção de biodigestores rurais. A disseminação dessa tecnologia tem sido uma proposta de relevância para a sustentabilidade na região,

cujo resultado ambiental e econômico tem sido positivo tanto para os proprietários quanto para o meio ambiente (PINTO *et al.*, 2018).

Apesar da vasta literatura sobre biodigestores e o processo da digestão anaeróbia identificou-se a seguinte problemática: uma carência no levantamento de dados sobre controle e monitoramento de grandezas físicas e das reações ocorridas nos biodigestores, principalmente no meio rural, no qual as utilizações de ferramentas tecnológicas sustentáveis promoveriam uma melhor eficiência no processo de geração de biogás e biofertilizante.

A finalidade desta pesquisa está voltada para a modelagem e construção de uma solução de monitoramento eletrônico em tempo real dos parâmetros de grandezas físicas ocorridas durante o processo de digestão anaeróbia, associado a um sistema tecnológico computacional que será responsável pelo armazenamento e a análise de dados que ficarão acessíveis de qualquer local através da Internet. Sistema esse que foi intitulado de UNIBIO - Sistema de Monitoramento de Biodigestores.

Esta solução visa propiciar maior segurança ao funcionamento dos biodigestores assim como a possibilidade do acompanhamento online dos parâmetros monitorados no processo da biodigestão.

Este monitoramento será realizado através de ciclos de digestão anaeróbia que serão processados em quatro protótipos, nos quais estarão equipados com sensores eletrônicos conectados à internet através de uma plataforma IoT. Esses protótipos idênticos serão alimentados com uma combinação distinta de filtros biológicos em estado líquido e sólido, para remoção de impurezas indesejadas no biogás produzido no processo.

Os seguintes parâmetros de grandeza física serão monitorados na linha de tempo do processo de digestão anaeróbia:

- Concentração dos Gases (Sulfídrico, Metano, Carbônico);
- Temperatura, Umidade relativa e Pressão Manométrica da câmara de gases;
- Temperatura da biomassa e do ambiente externo ao Biodigestor.

Após a finalização do ciclo de biodigestão o processo será repetido para fins de validação dos resultados do primeiro ensaio.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema computacional para monitoramento eletrônico em tempo real de parâmetros de grandezas físicas ocorridas durante o ciclo de vida do processo de digestão anaeróbia em biodigestores rurais conectados à internet através de uma plataforma IoT.

1.2 Objetivos Específicos

- Construir quatro protótipos de biodigestores de bancada, adaptados para o uso de sensores de monitoramento eletrônico;
- Desenvolver módulos de hardware controlador IoT baseado em Microcontrolador compatível com Arduino e dos módulos de sensores para serem acoplados nos biodigestores de bancada;
- Desenvolver módulos de software, que irão compor o sistema computacional da solução de monitoramento IoT do processo de biodigestão anaeróbia (software embarcado, software servidor, software cliente e banco de dados);
- Realizar dois ciclos de biodigestão anaeróbia com a utilização de biomassa de origem animal (esterco bovino) e aplicação de filtros combinados para biogás, em 4 protótipos de biodigestor monitorados pelo sistema UNIBIO;
- Analisar e apresentar os resultados coletados pelo sistema UNIBIO durante os processos de digestão anaeróbia e avaliação dos desempenhos dos filtros combinados para o biogás produzido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos Gerais de um Biodigestor

O biodigestor é definido como uma câmara hermeticamente fechada no qual ocorre um processo denominado de biodigestão anaeróbica de um composto orgânico (NOGUEIRA, 1986).

Neste processo uma série de microrganismos atuam transformando moléculas da matéria orgânica de estrutura complexas em estruturas simples que quando são metabolizadas tem como resultado uma mistura de gases e uma série de compostos reduzidos (SILVA *et al.*, 2012).

Tal processo pode ser utilizado em diversas aplicações que minimizam os impactos ambientais que seriam causados pela destinação incorreta dos resíduos orgânicos, tendo como subproduto dois novos produtos de valores agregados, sendo eles: o biogás, que pode ser utilizado como combustível para diversas aplicações, e o biofertilizante, que pode ser utilizado como adubo orgânico nas plantações (ALCÓCER *et al.*, 2014; BARREIRA, 2011).

Alcócer *et al.* (2019) relatou em experimentos práticos de implantação de biodigestores em propriedades de áreas rurais que eles possuem as seguintes vantagens para uso:

- 1) Manejo sustentável no destino dos dejetos orgânicos;
- 2) Custo acessível para implantação e operação;
- 3) Processo de biodigestão não gera custo de energia elétrica;
- 4) Produção de biocombustível e biofertilizante que agregam valor ao projeto;
- 5) Sustentabilidade ambiental e melhoria nas características físico-químicas do solo pela não contaminação com dejetos animais, assim como pela fertilização equilibrada com a utilização da matéria orgânica já processada pelo biodigestor, sendo ela rica em nutrientes benéficos à vegetação local.

Sansuy (2020) define biodigestor como um equipamento capaz de reaproveitar diversos tipos de caráter orgânico, podendo estes serem de origem: vegetal (como folhas e palhas), animal (como urina e esterco), humana (fezes ou lixo das casas) ou agroindustrial (como vinhaça e resíduos orgânicos da produção). Este atua na aceleração do processo de decomposição desses resíduos reduzindo os níveis de oxigênio, estando presente em um ambiente controlado de temperatura e

pH e disponibilidade de nutrientes para as bactérias, elementos vitais para que o fenômeno possa ocorrer.

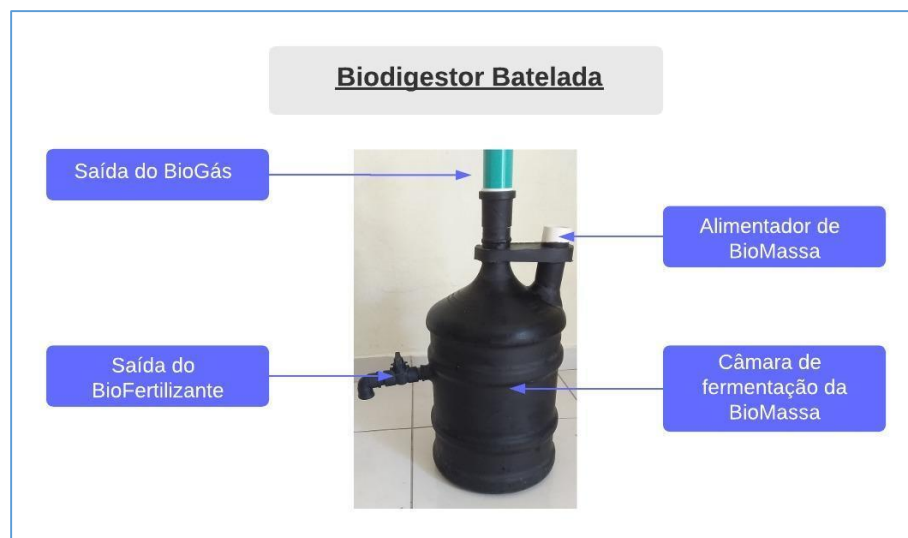
2.1.1 Classificação dos biodigestores

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

2.1.1.1 Biodigestor Batelada

O biodigestor do tipo batelada ou descontínuo para Deganutti *et al.* (2002) é um sistema bastante simples e de fácil manejo, composto por apenas um tanque anaeróbio ou uma série de tanques. Ele é abastecido uma única vez, ocorrendo o processo de fermentação da biomassa e após o período efetivo de produção do biogás, tendo seu material descarregado. Na **Figura 1** é apresentado um modelo de biodigestor batelada que foi utilizado nesta pesquisa.

Figura 1 – Modelo de um biodigestor batelada



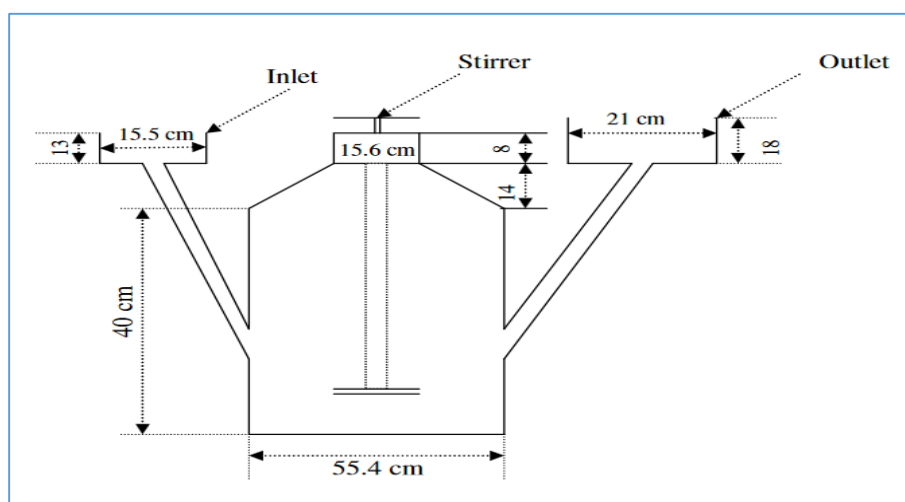
Fonte: Autor (2021)

2.1.1.2 Biodigestor Contínuo

Ainda segundo Deganutti *et al.* (2002) o biodigestor do tipo contínuo é utilizado em locais onde a biomassa é disponibilizada em períodos curtos, como em criações de gado, no qual é permitido a coleta diária dos dejetos bovinos, sendo estes enviados

frequentemente ao biodigestor. Diferentemente do modelo batelada que tem seu uso mais indicado quando essa disponibilidade da biomassa ocorre em períodos mais longos. Na **Figura 2** é apresentado um diagrama de montagem de um biodigestor do tipo de operação contínuo.

Figura 2 – Diagrama de um biodigestor de tipo de operação contínua



Fonte: OFOEFULE e UZODINMA (2009)

2.1.2 Modelos de biodigestores

Em relação aos modelos de biodigestores mais utilizados no Brasil, temos o modelo indiano, o modelo canadense e o modelo chinês. Esses três utilizam o modo de operação em processo contínuo, ao contrário do biodigestor batelada que possui o modo de operação em processo descontínuo.

2.1.2.1 Biodigestor de Modelo Indiano

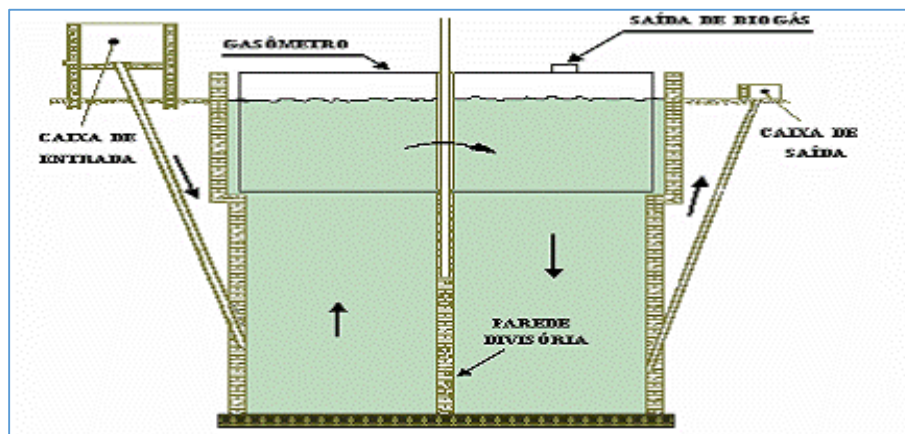
No modelo indiano existe uma espécie de campânula móvel, que pode estar mergulhada na biomassa e/ou em um selo d'água externo. Esta câmara móvel é responsável pela manutenção da pressão interna do sistema no qual vai se expandindo à medida que o biogás é gerado dentro da campânula. Internamente existe uma parede no centro do biodigestor que tem o objetivo de separar o tanque em duas partes, proporcionando a movimentação da biomassa por todo o fermentador.

Um fator importante a ser considerado neste modelo é que a concentração de sólidos totais não deve ser superior a 8%, facilitando assim a circulação do substrato

pelo interior da câmara e evitando o entupimento dos canais de entrada e saída dos materiais (DEGANUTTI, 2002; EMAS,2020).

A **Figura 3** apresenta a vista em corte do biodigestor de modelo indiano.

Figura 3 - Vista frontal, em corte, do biodigestor modelo Indiano



Fonte: TORRES, PEDROSA e MOURA (2009)

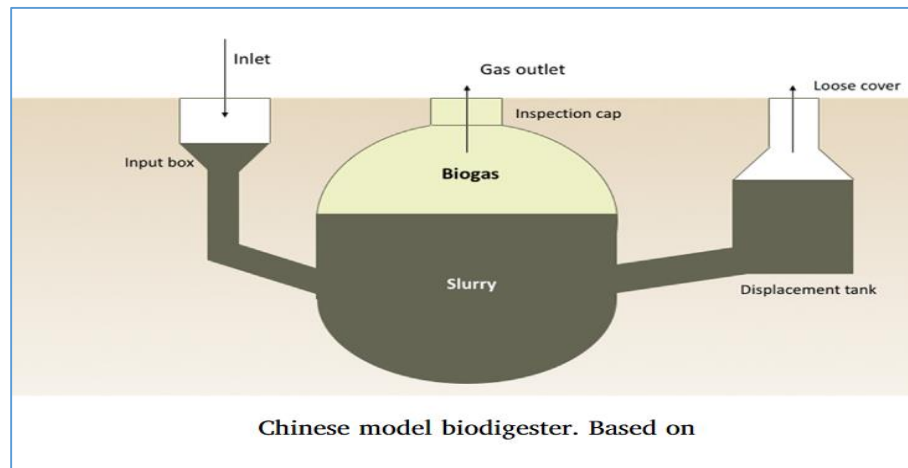
2.1.2.2 Biodigestor Modelo Chinês

Apesar da semelhança com o modelo indiano, o biodigestor de modelo chinês tem como diferencial a não utilização da campânula móvel, o que torna sua construção mais econômica. É utilizado o princípio de funcionamento de uma prensa hidráulica, levando ao deslocamento do fluido da biomassa em direção a caixa de saída quando ocorre uma variação de pressão na área de gásômetro em decorrência da geração do biogás (DEGANUTTI, 2002; EMAS,2020).

No que tange à sua construção, ela é praticamente toda feita com alvenaria, no qual o teto necessita ser impermeável para a retenção do biogás. A eficiência desse sistema depende da qualidade da vedação da estrutura superior que armazena o biogás, pois, caso haja alguma trinca ou fissura, pode ocorrer uma enorme perda de gases a partir do vazamento (DEGANUTTI, 2002; EMAS,2020).

Por conta de o gás gerado próximo à caixa de saída ser liberado na atmosfera, esse modelo de biodigestor não é utilizado em instalações de grande porte. Assim como no modelo indiano, a concentração máxima de sólidos totais recomendada é de 8% para evitar entupimentos no sistema de entrada da biomassa (DEGANUTTI, 2002; EMAS,2020).

A **Figura 4** apresenta o biodigestor em modelo chinês.

Figura 4 – Modelo de Biodigestor Chinês

Fonte: BENINCASA (1990) apud FREITAS et al. (2019)

2.1.3.3 Biodigestor Modelo Canadense

Este biodigestor possui uma construção bem simples, apesar de usar uma tecnologia moderna é praticamente todo construído por uma lona impermeável. Para tal, é utilizado um sistema horizontal coberto por uma cúpula, geralmente de plástico (PVC), maleável que infla com a produção do gás. Para o compartimento de biomassa é feito uma espécie de lagoa com a matéria orgânica, no qual a largura é maior que a profundidade, tornando a área de exposição ao sol maior e, conseqüentemente, aumenta a produção de biogás (TORRES, PEDROSA e MOURA, 2012).

Esse modelo tem um custo de construção muito baixo, sendo recomendado em áreas com um espaço maior para a construção da lagoa de dejetos. Por ter um custo muito baixo e alta capacidade de captação de biomassa e produção de biogás, atualmente, no Brasil, é um dos modelos mais utilizado, principalmente em fazendas e grandes áreas (TORRES, PEDROSA e MOURA, 2012).

Figura 5 – Modelo de Biodigestor Canadense



Fonte: TORRES, PEDROSA e MOURA (2012)

2.2 O papel dos biodigestores no meio ambiente e sustentabilidade

Segundo Barreira (2011), dejetos orgânicos, de origem animais e restos de vegetais, encontrados nas propriedades rurais são descartados de forma inadequada e sem controle, sendo eles poluentes que causam sérios danos ambientais no solo, nos efluentes, nos rios e na vegetação. A função primordial de um biodigestor é dar encaminhamento adequado a esses dejetos orgânicos, para que ao invés de serem descartados na natureza, estes sejam utilizados como fonte de matéria prima do fermentador, trazendo diversos benefícios significativos para o meio ambiente e para as pessoas que habitam na região.

Alcócer *et al.*(2019) em sua obra afirma, do ponto de vista social, que as famílias do meio rural podem usufruir das vantagens oferecidas pela tecnologia do biodigestor, pois além de ser benéfico ao meio ambiente, produz um produto de valor agregado que possibilita o incremento da renda familiar, como: a utilização dos gases combustíveis para a manufatura de produtos alimentícios, que podem ser comercializados na região; a utilização do biofertilizante na agricultura familiar, aumentando a produtividade das espécies cultivadas; além da economia em despesas, como a compra de gás GLP, fertilizantes minerais industrializados e defensivos agrícolas; havendo ainda a possibilidade de uma renda extra com a venda dos créditos de carbono.

Presse (2019) noticiou que a concentração dos principais gases causadores do efeito estufa na atmosfera atingiu um recorde no ano de 2018, conforme anunciado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), que é ligada a Organização das Nações Unidas (ONU). De acordo com o levantamento científico, o dióxido de carbono (CO_2), que é um dos principais causadores do efeito estufa presente na atmosfera, atingiu a marca de 407,8 parte por milhões (ppm), sendo este um nível 147% superior aos níveis do período pré-industrial de data de 1750.

Neste contexto Junior, Pires e Cunha (2016) concluíram que a bovinocultura é responsável por grande parte de emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo necessário que medidas de mitigação sejam tomadas. Para isso, é necessário incentivar a construção de equipamentos com a tecnologia do biodigestor anaeróbico, dando assim a destinação e o aproveitamento adequados aos dejetos orgânicos gerados nas propriedades rurais. Desse modo, além de evitar a proliferação dos GEE lançados na atmosfera terrestre, é oferecido também fonte de renda extra para essas propriedades.

Pereira (2012) afirma que o biodigestor é uma fonte de energia renovável que traz diversos benefícios para o meio ambiente. No entanto, possui como maior problema para a implantação e popularização desses dispositivos tecnológicos o custo do investimento inicial dos produtores rurais. Concomitante a isso, o governo tem aberto oportunidades para esse tipo de investimento sustentável, proporcionando que esse investimento inicial na implantação do biodigestor seja recuperado em até 12(doze) meses.

Seguindo na linha de preocupação com o aumento dos GEE na atmosfera terrestre, temos o gás metano (CH_4) como outro grande vilão do meio ambiente, o mesmo é produzido pela decomposição da matéria orgânica. Este é abundante em aterros sanitários e tem grande parte da sua origem na bovinocultura, no qual a pecuária representa 16% das emissões mundiais de gases de efeito estufa. Quando comparado ao CO_2 , o metano é mais eficiente na captura de radiação do que o gás carbônico. O impacto comparativo de CH_4 sobre a mudança climática chega a ser mais de 20 vezes maior do que o CO_2 , ou seja, 1 unidade do gás metano equivale a 20 unidades de CO_2 . Logo, temos uma outra grande vantagem da aplicação do biodigestor: ele irá reter o gás metano, evitando que o mesmo seja lançado diretamente na atmosfera e disponibilizando o mesmo para ser utilizado com gás combustível (GASES, 2014).

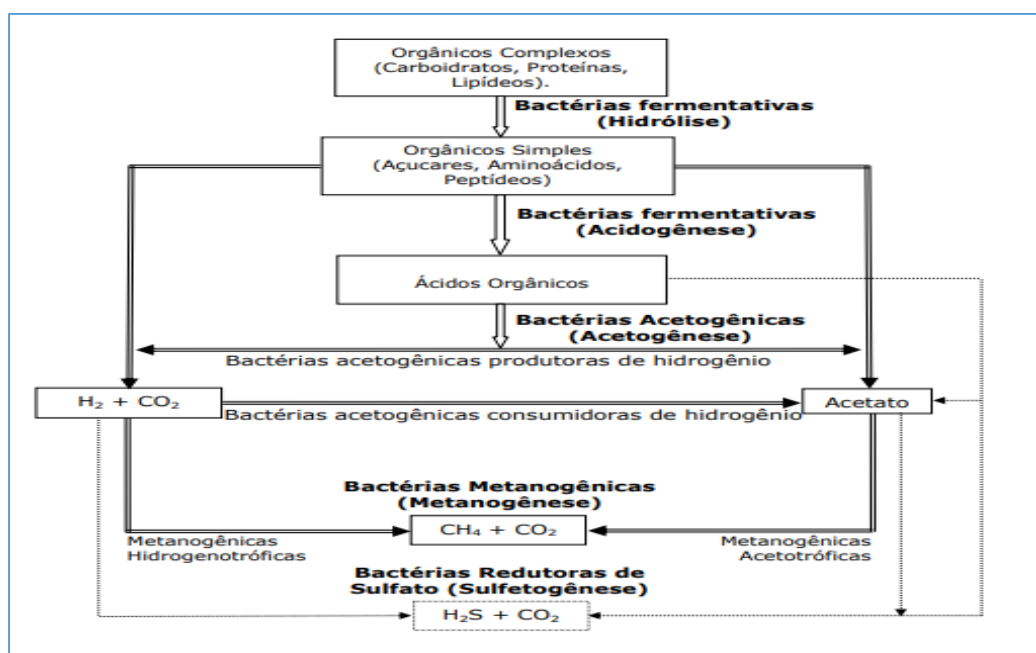
Em suma, é perceptível o nível de importância, atualmente, da utilização do equipamento biodigestor anaeróbico nas propriedades rurais, agrícolas e pecuárias na promoção da sustentabilidade ambiental e econômica para os proprietários e para a comunidade que habita na região.

2.3 Digestão Anaeróbia

Para que seja gerado o biogás é necessário que a matéria orgânica utilizada na biodigestão passe por um processo de decomposição em meio anaeróbico com o auxílio de bactérias anaeróbicas, esse processo é chamado de digestão anaeróbica. Esse dinamismo é comum de ocorrer na natureza, acontecendo por exemplo em pântanos, fundos de lagos e esterqueiras. E além do biogás produzido, energia em forma de calor é gerada e nova biomassa é produzida (FREIHE, WEILAND e SCHATTAUER, 2010).

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 patogênicos), produção de biogás e produção de biofertilizantes mais estáveis, mais ricos em nutrientes assimiláveis e com melhores qualidades sanitárias em relação ao material original.”.

Figura 6 – Processo de digestão anaeróbia



Fonte: SILVA (2009)

O processo de digestão anaeróbica acontece em 4 etapas principais, que são explicadas a seguir. Essas etapas na verdade ocorrem de forma paralela, mas ao separar o processo, torna-se mais fácil a análise da produção de biogás. A **Figura 6** apresenta a interação entre cada uma das etapas (FREIHE, WEILAND e SCHATTAUER, 2010; SILVA, 2009).

- **Hidrólise:** Primeiro estágio em que os compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) são decompostos em substâncias menos complexas (aminoácidos, açúcares e ácidos gráxicos). No processo atuam bactérias hidrolíticas cujas enzimas liberadas decompõem o material por meio de reações bioquímicas.
- **Acidogênese:** Por meio de bactérias fermentativas acidogênicas, os compostos intermediários formados na hidrólise são decompostos em ácidos graxos de cadeia curta (ácidos acético, propiônico e butírico), dióxido de carbono e hidrogênio. Formam-se também pequenas quantidades de ácido láctico e álcoois.
- **Acetogênese:** Através de bactérias acetogênicas, os ácidos gráxicos e os álcoois formados na etapa de Acidogênese são transformados em acetato, hidrogênio (H_2), e gás carbônico (CO_2), que são substratos importantes na produção de metano (CH_4).
- **Metanogênese:** Nessa fase o acetato, o hidrogênio e dióxido de carbono são convertidos em metano e dióxido de carbono através de um grupo de procariontes, chamadas de metanobactérias. Entre as metanobactérias há dois tipos, os metanógenos hidrogenotróficos que produzem metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono, e os metanógenos acetoclásticos que produzem metano através da redução do ácido acético.

As reações e bactérias envolvidas em cada etapa do processo são apresentadas no **Quadro 1**.

Quadro 1 – Reações envolvidas no processo de digestão anaeróbia

Reação Química	Bactérias Envolvidas
Hidrólise	
$(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O = n(C_6H_{12}O_6)$	
Acidogênese	
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O = 2CH_3COOH + 4H_2 + CO_2$	Bacteriodes, clostridium
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O = 2CH_3COOH + 4H_2 + CO_2$	Butyrivibrie, eubacterium
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O = 2CH_3COOH + 4H_2 + CO_2$	Bifidobacterium, lactobacillus
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O = 2CH_3COOH + 4H_2 + CO_2$	
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O = 2CH_3COOH + 4H_2 + CO_2$	
Acetogênese	
$CH_3CHOHCOOH + H_2O = CH_3COOH + CO_2 + 2H_2$	Desulfovibrio, syntrophobacter
$CH_3CH_2OH + H_2O = CH_3COOH + 2H_2$	Wolinii, syntrophomonas
$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O = 2CH_3COOH + 2H_2$	
$CH_3CH_2COOH + 2H_2O = CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$	
Metanogênese	
$4H_2 + CO_2 = CH_4 + 2H_2O$	Methanobacterium formicicum
$2CH_3CH_2OH + CO_2 = 2CH_3COOH + CH_4$	Methanobacterium bryantii, Methanobrevibacter
$2CH_3(CH_2)_2COOH + 2H_2O + CO_2 = 4CH_3COOH + CH_4$	Ruminantium, Methanobrevibacter arboriphilus
$CH_3COOH = CH_4 + CO_2$	Methanospirillum hungatei
	Methanosarcina barkeri

Fonte: adaptado de ABASSI, TAUSEEF e ABASSI (2011)

Estima-se que 30% do gás metano provêm da redução do CO_2 com H_2 e os outros 70% provêm da redução do ácido acético (CH_3COOH). (GUJER e ZEHNDER,1983 apud SILVA,2009)

Na quarta etapa, a metanogênese, é onde normalmente ocorre a limitação da produção de gás. Isto se dá por conta da alta sensibilidade das bactérias metanogênicas a fatores como estado do substrato, condições do ambiente e características do biodigestor. Os seguintes fatores devem ser observados. (SOUZA, 1984)

- Temperatura: Bactérias metanogênicas são sensíveis principalmente à elevadas variações de temperatura, o que deve ser evitado. O processo de digestão pode ocorrer normalmente numa temperatura entre 15 °C e 40 °C, sendo a faixa de melhor eficiência uma temperatura entre 30° C e 40°C.
- Ausência de oxigênio: Como as principais bactérias do processo são anaeróbicas, a presença de oxigênio na biomassa pode ocasionar mortes das bactérias.
- pH: Caso as bactérias metanogênicas trabalhem em condições adversas, os ácidos voláteis presentes na biomassa não seriam devidamente transformados

em gás metano, assim, com o tempo haveria um aumento na acidez da biomassa, provocando uma queda no pH. Em contraponto, para as bactérias metanogênicas o pH ótimo é entre 6,8 e 7,2, dessa forma, à medida que o pH diminui, a eficiência das bactérias metanogênicas também diminui, assim ocorrendo um efeito cadeia podendo ocasionar perda total do biodigestor.

2.4 Biogás

“Biogás” é o nome popular usado para se referir a uma mistura inflamável de gases que são geradas quando o material orgânico sofre digestão anaeróbica. Essa mistura geralmente contém de 40% a 70% de metano, 25% a 45% de gás carbono, e o restante de hidrogênio, nitrogênio e ácido sulfídrico. Essa mistura possui bom poder calórico e pode ser utilizado como combustível ou para gerar energia elétrica indiretamente. (ABASSI, TAUSEEF e ABASSI,2011)

Na **Tabela 1** é apresentado a comparação do poder calórico do biogás com outros combustíveis comumente usados. O biogás possui bom poder calórico, sendo um pouco inferior ao LPG e ao Gás Natural. (ABASSI, TAUSEEF e ABASSI,2011)

Tabela 1 – Poder calórico do Biogás

Combustível	Valor Calórico
Gás Natural	8.600 kcal m ⁻³
LPG	10.800 kcal kg ⁻¹
Querosene	10.300 kcal kg ⁻¹
Diesel	10.700 kcal kg ⁻¹
Biogás	5.000 kcal m ⁻³

Fonte: Adaptado de ABASSI, TAUSEEF e ABASSI (2011)

O principal problema do biogás, que se torna um fator limitante, é a presença do ácido sulfídrico. Para o homem o ácido sulfídrico tem um alto potencial irritante, incomodando os olhos e o nariz num primeiro contato, e uma alta exposição a esse ácido pode causar um coma imediato e até mesmo a morte. Além do efeito no corpo humano, esse ácido também pode afetar mecanismos de metal, ocorrendo corrosão e desgaste, desse modo, torna-se pouco atrativa a utilização desse gás em máquinas industriais. (AL MAMUN e TORII,2015; FRARE, GIMENES e PEREIRA,2009)

Uma alternativa para utilização do biogás sem restrições é a remoção do H₂S pelo processo de absorção química. Nesse processo a mistura gasosa passa ou tem contato com um líquido no qual o H₂S seja solúvel, assim ocorre uma reação química

e o ácido é absorvido, não completamente, mas esse processo pode ser feito mais de uma vez. (FRARE, GIMENES e PEREIRA,2009)

Ademais, diferentes fontes de biomassa geram composições diferentes no biogás gerado. Os principais fatores de alteração são: o substrato, carga orgânica da fonte e taxa de alimentação e geração do digestor. Na **Tabela 2** são apresentadas as diferentes composições do biogás para diferentes tipos de fontes. (THE BIOGAS,2009)

Tabela 2 – Composição do Biogás para diferentes fontes

Componentes	Lixo doméstico	Lodo de estações de tratamento de águas residuais	Resíduos agrícolas	Resíduos agropecuários
CH ₄ (% vol)	50-60	60-75	60-75	68
CO ₂ (% vol)	38-34	33-19	33-19	26
N ₂ (% vol)	5-0	1-0	1-0	-
O ₂ (% vol)	1-0	<0,5	<0,5	-
H ₂ O (% vol)	6 (à 40 °C)	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)
Total (% vol)	100	100	100	100
H ₂ S (mg / m ³)	100 - 900	1000 - 4000	3.000 - 10.000	400
NH ₃ (mg / m ³)	-	-	50 - 100	-
Aromáticos (mg / m ³)	0 - 200	-	-	-
Organoclorado ou Organofluorado (mg / m ³)	100-800	-	-	-

Fonte: Adaptado de THE BIOGAS (2009)

2.5 Biofertilizantes

Segundo Alcócer *et al* (2019), o biofertilizante é um produto da ação de microrganismos dentro do biodigestor que em sua maioria dos casos é utilizado como fonte de insumo o esterco fresco de origem animal, podendo utilizar-se também matéria orgânica de espécies vegetais.

O uso do biofertilizante, por sua alta capacidade de fertilização, favorece o desenvolvimento das plantas melhorando seu desempenho vegetativo e tornando-as mais produtivas e vigorosas. Além disso, possui propriedades defensivas para certos tipos de pragas, podendo ser utilizado como substituto orgânico em alguns casos de

agrotóxicos que possuem alto poder de agressão ao meio ambiente. (WESTRUP et al, 2015 apud ALCÓCER et al., 2019)

Para Barros (2017), o biofertilizante trata-se de um subproduto obtido a partir da fermentação anaeróbica de resíduos da lavoura ou dejetos de animais na produção de biogás, que sob sua forma líquida apresenta uma complexa composição de nutrientes que são essenciais para o desenvolvimento das plantas. Destacam-se entre eles, o nitrogênio (N) e o fósforo (K), pelo fato de que além da disponibilidade de outros micro e macro nutrientes, ele possui um pH básico tendendo a uma leve alcalinidade de aproximadamente 7,5. Tal biofertilizante atua como corretivo de pH do solo, principalmente em solos ácidos, além de não propagar mau cheiro e não ser poluente. Ademais, sua aplicação em plantações favorece a multiplicação de microrganismos, proporcionando uma vitalidade biológica no solo e contribui para melhoria da porosidade e aeração do solo, importantes fatores para manter a sanidade das raízes.

Ainda segundo Barros (2017) o líquido retirado do biodigestor pode ter seu uso via foliar ou no caule das plantas, podendo ainda ser decantado. Ocorre, então, a separação da parte pastosa, que, após processo de secagem, pode ser aplicada diretamente no solo como um excelente adubo orgânico. A parte líquida deve ser pulverizada sempre depois das regas ou chuvas para evitar perdas por lixiviação. Seu uso deve ser controlado, visto que apesar das inúmeras vantagens o uso em excesso do biofertilizante pode causar desequilíbrios químicos, físicos e biológicos. Esse excedente acarreta um solo impróprio para o cultivo de certas espécies, assim como no uso excessivo dos fertilizantes químicos. O biofertilizante tem obtido bons resultados no cultivo de cereais, pastagens e hortaliças. Todavia, salienta-se que no Brasil é proibido a aplicação via foliar de fertilizante provenientes de dejetos animais em hortaliças, uma vez que são ingeridas cruas, tendo como alternativa a utilização diretamente no solo.

Na **Figura 7** é apresentado um exemplo prático do potencial fertilizante do biofertilizante originado pelo processo de biodigestão a partir do esterco bovino. Torna-se possível a comparação entre o cultivo da espécie hortelã-piperita em solo, sob as condições de A-irrigação com água potável, e B-fertirrigação, com o biofertilizante gerado no primeiro ensaio de biodigestão dessa pesquisa.

Figura 7 – Resultado do biofertilizante

Fonte: Autor (2021)

O **Quadro 2** apresenta em resolução melhorada as condições que ocorreram o experimento.

Quadro 2 - Condições do experimento do biofertilizante

A1	B1
15/09/2020 – Amostra A - Mudanças de Hortelã Piperita 45 dias de germinadas.	15/09/2020 – Amostra B - Mudanças de Hortelã Piperita 45 dias de germinadas.
A2	B2
15/11/2020 – Amostra A - Mudanças de Hortelã Piperita 60 dias de Transplante. Adubação Inicial: 30% de Terra vegetal 20% de Húmus de Minhoca 30% Areia Lavada Média 10% Fibra de Coco 5% de Vermiculita 5% Esterco de Gado Curtido Adubação Continuada: Irrigação com Água Potável a cada 48 Horas.	15/11/2020 – Amostra B - Mudanças de Hortelã Piperita 60 dias de Transplante. Adubação Inicial: 30% de Terra vegetal 20% de Húmus de Minhoca 30% Areia Lavada Média 10% Fibra de Coco 5% de Vermiculita 5% Esterco de Gado Curtido Adubação Continuada: Irrigação com Água Potável a cada 48 Horas. Fertirrigação no solo com biofertilizante (Metabolizado pelo Biodigestor) a cada 96 Horas.

Fonte: Autor (2021)

2.6 Indústria 4.0

O termo “Indústria 4.0” foi introduzido na Alemanha em uma das maiores feiras globais do mundo, a FERIA de Hannover de 2011, para descrever como será a revolução na organização das cadeias de valores globais, a quarta revolução industrial.

A quarta revolução industrial ou “Indústria 4.0” é definida ao permitir que fatores “inteligentes” sejam agregados, assim sendo criado um mundo onde os sistemas de manufatura virtual e físico cooperam um com o outro de forma flexível. Muito além dos sistemas conectados, a “Indústria 4.0” traz mudanças significativas em áreas que vão desde sequenciamentos de genes à nanotecnologia, de energias renováveis à computação quântica. Ou seja, o que torna essa revolução fundamentalmente diferentemente das revoluções anteriores, é que há uma fusão de tecnologias de domínios físicos, digital e biológico (SCHWAB, 2017).

Por outro lado, Gilchrist (2016) defende que no meio de tantas tecnologias do século 21, a indústria 4.0 não é um novo conceito: está mais para um renascimento de um antigo conceito que utiliza as mais novas tecnologias desenvolvidas. Assim sendo, a indústria 4.0 é essencialmente uma revisão aplicada à manufatura que faz uso das últimas invenções tecnológicas e inovações.

Para a quarta revolução originar-se, as revoluções industriais anteriores estabeleceram algumas condições favoráveis que foram essenciais, pensando nisso Pozdnyakova et. al. (2019) expõe algumas características e faz uma visão geral de cada revolução:

- Primeira Revolução Industrial: Transição do trabalho manual para o trabalho de máquina. Se tornou uma época de reforma para o sistema capitalista. Uma modernização que influenciou principalmente a esfera política e econômica.
- Segunda Revolução Industrial: Caracterizada pela energia elétrica e pelos carros. A eficiência do trabalho melhorou. As principais mudanças ocorrerão na esfera energética: o vapor foi substituído pela eletricidade. Com a energia elétrica iniciou-se uma revolução global.
- Terceira Revolução Industrial: Surgiu baseada na recusa no uso de minerais, transição para energias renováveis e com a implementação de sistemas computacionais na produção, automatização e na transição para a produção de aditivos digitais (apud. KUPRIYANOVSKY et al. 2016). Houve também

transformações profundas nos sistemas, estruturas, instituições, relações, tecnologias e na forma de comunicação.

- Quarta Revolução Industrial: Caracterizada pelos sistemas físicos cibernéticos nos processos de fabricação. Entra também a internet das coisas, que rapidamente entra na vida da sociedade de consumidores. Além disso, todos os estágios de produção na indústria são formados sem a necessidade da participação humana.

“Indústria 4.0” é um tema bastante debatido, existem muitas ideias e conceitos formuladas por teóricos e cientistas do mundo todo. Tendo em vista isso, Sukhodolov (2019) realizou uma análise, sistematização e classificação da literatura existente sobre a quarta revolução industrial, e como resultado, o autor foi capaz de distinguir quatro abordagens conceituais principais para o tratamento da noção de “Indústria 4.0”:

- Abordagem socio-orientada: Abordagem que enfatiza que o desenvolvimento da Indústria 4.0 influencia fortemente na sociedade moderna, podendo ter manifestações positivas e/ou negativas. De um lado essa revolução possibilita a criação de novos benefícios, assim estimulando uma melhora no padrão de vida. Por outro lado, por acabar reduzindo a participação humana no processo de produção, pode ocorrer o desemprego em massa, sendo um dos fatores restritivos para o desenvolvimento da Indústria 4.0.
- Abordagem baseada em competência: Expõe que o desenvolvimento da Indústria 4.0 requererá novas competências dos especialistas modernos. Ocorrendo então mudanças estruturais tais como substituição do trabalho manual para o intelectual, e mudanças qualitativas onde o especialista deverá ter posse de conhecimento e capacidade de usar novas tecnologias de informação e comunicação.
- Abordagem de produção: Essa abordagem esclarece que o desenvolvimento da Indústria 4.0 significa modernização da indústria com a automatização em larga escala dos processos de produção.
- Abordagem comportamental: Expõe que com desenvolvimento da Indústria 4.0, ocorrerá uma transição para a interação objeto-objeto, ou seja, será eliminado o subjetivo (ser humano) da inter-relação entre os objetos inanimados (dispositivos técnicos), a interferência humana em alguns processos mais

subjetivos não será mais necessária. Ademais, podemos dizer que o ser humano será substituído pela Inteligência Artificial.

Gilchrist(2016) em seu livro destaca as principais tendencias tecnológicas que são ditas para serem o instrumento primário na modelagem da produção industrial no espectro da Industria 4.0, essas tendencias são expostas a seguir:

- Big Data e Análise de Dados: O setor de manufatura se encontra inundado com o aumento da quantidade de dados a partir de diferentes fontes, sendo necessário juntar todos esses dados, coletar e organizá-los de forma coerente, formando um Big Data e utilizando a análise para dar suporte na tomada de decisões.
- Robôs Autônomos: A utilização de robôs já era comum, mas agora eles estão sendo projetados para serem autossuficientes, autônomos sem a necessidade de interação humana, eles deixarão de serem ferramentas e se tornarão unidades de trabalho integral.
- Simulação: Muitas vezes, para um manufactureiro testar se um processo era eficiente, o método de tentativa e erro era utilizado, mas agora com a virtualização testes podem ser feitos antes de serem implementados.
- Integração Horizontal e Vertical do Sistema: O objetivo é criar um cenário onde a engenharia, produção, marketing e pós-vendas são intimamente ligados.
- Industrial Internet of Things (IoT): Computação embarcada e a internet irão conectar sensores transdutores e dispositivos entre si, além de se conectar com um gateway que fornecera dados para a Fábrica Inteligente, sendo uma parte essencial da Industria 4.0.
- Cyber Segurança: Em 2015 os setores industriais foram alvos dos ataques dos cybers criminosos, assim sendo é necessário reconhecer vulnerabilidades nos sistemas industriais e os desafios a integração do controle de processo industrial e sistemas de produção que utilizam a internet.
- A Nuvem: Provedores de serviço de nuvem oferecem a capacidade para lidar com as grandes quantidades de dados envolvidos na Industria 4.0, assim sendo criado nuvens privadas que se adequam ao armazenamento e processamento de dados das fábricas.
- Fabricação Aditiva: A fabricação aditiva, como exemplo principal a impressora 3D, permitem fabricantes criarem protótipos e designs de prova-de-conceito, o

que reduz significamente o tempo de projeto e energia gasta.

- **Fabricação Aditiva:** A fabricação aditiva, como exemplo principal a impressora 3D, permitem fabricantes criarem protótipos e designs de prova-de-conceito, o que reduz significamente o tempo de projeto e energia gasta.
- **Realidade Aumentada:** As fábricas estão se virando para os sistemas baseados em realidade aumentada para melhorar seus processos de manutenção enquanto diminui os custos com profissionais presencialmente.

Com base nisso tudo, podemos ver que o conceito de quarta revolução industrial não é uma simples ideia que ainda está em formalização, toda a comunidade científica na área de tecnologia e países como Alemanha, China, EUA e Reino Unido estão investindo seus esforços nesse novo futuro. Já está havendo consideráveis avanços na Indústria 4.0, avanços esses não muito “palpáveis”, porém que permitem dar uma ideia das grandes mudanças que estarão por acontecer.

2.7 Sistemas Embarcados

2.7.1 Microcontroladores

Um microcontrolador pode ser considerado um microcomputador, sendo ele utilizado para processar informações adquiridas de algum meio, como sensores ou Internet, e então realizar alguma atividade específica com base nessas informações processadas. Ele é muito presente na automação ou automatização de atividades ou coisas.

Outrossim, para um dispositivo ser considerado um computador é necessário haver um processador, memória e periféricos de entrada e saída. Penido e Trindade (2013) definem um Microcontrolador como *“um computador em um único chip. E nesse chip existe um processador, memória, periféricos de entrada e saída, temporizadores, dispositivos de comunicação serial, dentre outros”*.

2.7.2 IoT (Internet of Things)

Com o avanço da tecnologia, surgiu uma nova tendência, conectar coisas e objetos com a Internet. Segundo Santos *et al.* (2016), IoT é definida como uma extensão da Internet atual, proporcionando aos objetos do dia a dia uma habilidade computacional e a possibilidade de conexão.

Atualmente já existem várias tecnologias inteligentes no mercado presentes no controle de luzes de uma casa, geladeiras, máquinas de lavar roupa, televisões (Smart TV), sendo o principal propulsor dessa nova tendência tecnológica o aparelho celular, visto que a partir dele é possível tanto controlar quanto monitorar esses dispositivos. Assim como dito por Leite *et al.* (2017), essa nova forma de utilização da Internet visa interligar aparelhos de uso cotidiano, executando assim uma comunicação entre coisas e permitindo uma maior automatização no dia a dia, por intermédio do uso do aparelho celular.

Aplicações IoT podem ser grandes parceiros na busca da sustentabilidade, pois facilita aspectos ambientais, sociais e econômicos da sustentabilidade. Por exemplo, em uma aplicação no setor de cadeia de suprimentos agroalimentar, o desperdício de alimento pode ser evitado, a emissão de carbono pode ser reduzida, o uso de pesticidas pode ser reduzido, entre outros benefícios (MAROLI, NARWANE e GARDAS, 2021).

2.7.3 Arduino

Arduino é definido por seus criadores como *“uma plataforma eletrônica open-source baseado em hardware e software easy-to-use (facilidade de uso)”*. Isto é, uma plataforma de desenvolvimento de embarcados com uma grande comunidade, que visa a facilidade e a velocidade, sendo muito utilizado para fazer protótipos, entretanto, em alguns casos é usado no produto de mercado (MCROBERTS, 2018).

O Arduino se popularizou pela facilidade e pelo grande suporte da comunidade que por meio de bibliotecas gratuitas, têm-se códigos prontos para interação com alguns dispositivos, como telas LCD ou sensores. Desse modo, é necessário preocupar-se apenas com o objetivo final do projeto.

2.7.4 ESP-8266

O ESP-8266 é uma plataforma para desenvolvimento de embarcados com a diferença que conta com WiFi integrado, facilitando na criação de dispositivos IoT. Entre as vantagens desse controlador se destaca o preço, que comparado com outras plataformas de internet presente no mercado, é a que possui melhor custo-benefício. Outro importante ponto desse micro, é que se pode usar o Arduino IDE para programá-lo, ou seja, é tão fácil programá-lo quanto programar um Arduino (MEHTA, 2015).

2.7.5 Arduino IDE e Bibliotecas

O Arduino IDE é um ambiente de desenvolvimento integrado para microcontroladores, principalmente dispositivos Arduino, mas não limitado a eles. No projeto o Arduino IDE foi utilizado para programar os firmwares do Arduino Mega e do ESP-8266.

O Arduino IDE facilita o processo de desenvolvimento de microcontroladores, no próprio aplicativo é possível compilar, transferir o código para o dispositivo, localizar os erros, ter acesso a um monitor da comunicação e até um plotter (gerador de gráficos), e baixar bibliotecas da comunidade.

O Arduino IDE é disponibilizado pela empresa que fabrica o Microcontrolador Arduino, ligadamente a um conjunto de bibliotecas que facilitam o processo de desenvolvimento. Ademais, paralelamente a esse conjunto de bibliotecas principal, existe uma extensa comunidade na Internet que disponibilizam bibliotecas que permitem a utilização de um sensor ou novo dispositivo, até mesmo de um protocolo como o HTTP.

2.7.6 Linguagens C e C++

C é uma linguagem de programação compilada e estruturada, muito utilizada em sistemas de embarcados por conta do alto poder de liberdade tendo em vista os recursos limitados num sistema desse tipo. Já C++ é uma linguagem de programação compilada e orientada a objetos, sendo uma extensão da linguagem C, e mais utilizada em sistema embarcados, o qual possui mais recursos de memória e processamento.

O Arduino e o ESP-8266 são programados utilizando C++ em conjunto com C, a partir disso é possível ter maior controle dos recursos do dispositivo, tendo a simplicidade do C em operações mais básicas, e a possibilidade de usar a orientação a objetos para simplificar alguns processos, como por exemplo criar uma classe que define um sensor ou um atuador.

2.8 Infraestrutura Computacional

2.8.1 Nginx – Proxy Reverso

Nginx é descrito no site oficial de distribuição como um servidor de HTTP e de proxy reverso, um servidor de proxy de e-mails e um servidor genérico de proxy de TCP/UDP.

No entanto, foi utilizado no sistema somente a função de proxy reverso, para que no mesmo domínio da Internet se pudesse ter acesso a várias aplicações instaladas no servidor.

Essa função é utilizada como um servidor que é instalado no servidor web, todas as requisições que vão para ele passam primeiro pelo proxy reverso, no qual serão validadas e encaminhadas para a aplicação desejada dentro do servidor. Proxy reverso tem esse nome porque normalmente Proxy são instalados no lado do cliente, mas no caso do Nginx é instalado no lado do servidor.

2.8.2 Node.js – Servidor Web

Node.js é um interpretador assíncrono, orientado a evento, de linguagem JavaScript. Esse interpretador foi projetado e desenhado para criar aplicações de rede altamente escaláveis. (Informações retiradas do site do distribuidor¹).

No sistema o Node.js é utilizado para executar a API RESTful, que foi escrita em JavaScript.

Esse interpretador tornou-se famoso por conta da possibilidade de o desenvolvedor precisar aprender apenas uma linguagem de programação para criar aplicações web, que no caso seria o JavaScript. Em qualquer aplicação web a linguagem JavaScript é necessária, pois inicialmente era executada no lado do cliente e assim as páginas web eram mais interativas e a complexidade no lado servidor era diminuída. Mas no servidor a linguagem utilizada antes do Node.js não era JavaScript, então os desenvolvedores além de terem conhecimentos em HTML e CSS, precisavam aprender JavaScript e outra linguagem de programação, para assim criar uma aplicação web completa, mas com uma nova linguagem em jogo, a curva de aprendizado aumenta, então o Node.js apareceu para simplificar as coisas.

¹ Disponível em: <https://nodejs.org/en/about/> , Acesso em: 23 mar. 2021.

2.8.3 Ubuntu – Linux

Ubuntu é um Sistema Operacional Linux de código aberto sobre a licença GNU GPL. Muito utilizado pela facilidade de instalação e configuração em comparação com outras distribuições Linux. Além de possuir um amplo suporte da comunidade na Internet, alto desempenho para servir como servidores, e nenhum custo de uso além do gasto com energia da máquina.

Ubuntu foi o Sistema Operacional escolhido para hospedar o sistema UNIBIO.

2.9 Sistemas de Software

2.9.1 Arquitetura REST

Fielding (2000) descreve o REST, *Representational State Transfer* (Transferência de Estado Representativo), como um estilo de arquitetura para Sistema de Hipermídia Distribuídos, no qual é definido um conjunto de restrições que são aplicadas aos elementos internos do sistema. Pode ser vista também como uma descrição de como utilizar o protocolo HTTP para auxiliar na criação de API.

Essas restrições são definidas especificamente por FIELDING (2000):

- Estilo Nulo (Null-Style): Diz que antes que a arquitetura seja utilizada, deve-se primeiro ter o escopo do sistema bem definido, para assim então ser aplicado restrições e regras;
- Cliente-Servidor (Client-Server): A separação de interesses é o que desejado. É separado do usuário as questões de armazenamento de dados, ou seja, é definido para os clientes do servidor uma interface com a interação de dados, sem que eles precisem se preocupar especificamente em como é armazenado esses dados;
- Sem Estado (Stateless): Na interação cliente-servidor, não se deve ser armazenado no servidor estado de sessão ou algum dado que será reutilizado em outra requisição, ou seja, em cada requisição deve-se ter todos os dados necessários para o processamento da requisição;
- Cache: Define que a resposta de uma solicitação ao servidor deve ser rotulada como armazenável ou não armazenável em cache, caso seja armazenável em cache o cliente terá a opção de reutilizar os dados da resposta;
- Interface Uniforme (Uniform Interface): É o grande diferencial da arquitetura, que propõe que a interface de interação seja clara e uniforme para qualquer usuário,

facilitando e padronizando, além de oferecer possibilidades de outras interações. Contudo, pode afetar a eficiência por conta da padronização. A principal característica notória são as rotas, no qual devem-se ter uma hierarquia dos dados e não se deve ter função explícitas nas rotas;

- Sistemas em camadas (Layered System): O sistema pode ter várias camadas, que seriam servidores intermediários, para, por exemplo, melhorar escalabilidade, permitir balanceamento de carga, cache compartilhado, aplicação de políticas de segurança;
- Código-Sob-Demanda (Code-On-Demand): O Serviço pode disponibilizar mini aplicativos ou scripts para ser executado no cliente. É uma restrição opcional, pois pode afetar na restrição de interface uniforme;

Apesar de todas essas restrições, não é definido uma obrigação, uma vez que o REST é apenas um estilo de arquitetura. Salvadori, Siqueira (2015) explicam sobre o nível de maturidade de APIs RESTful (APIs que seguem a arquitetura REST), definido como RMM (Richardson Maturity Model), onde a API é classificada em 4 níveis:

- 1º nível de maturidade: O HTTP é usado apenas como um protocolo de transferência de dados sem se preocupar com a semântica de métodos HTTP ou com princípios da arquitetura REST;
- 2º nível de maturidade: Nesse nível as rotas começam a ser definidas. Todo recurso é unicamente identificado e endereçado. Cada recurso pode ser acessado por seus próprios tipos de operação;
- 3º nível de maturidade: Aqui o serviço já está em conformidade com a semântica do HTTP. Tem-se o correto uso dos métodos HTTP, no qual POST cria um recurso, PUT modifica, GET requisita e DELETE remove o recurso correspondente;
- 4º nível de maturidade: O serviço está implementado com o princípio de HETEOAS, isto é, o cliente pode navegar e explorar os recursos sem necessitar de conhecimentos das características de implementação e nem documentação.

2.9.2 Interface de Programação de Aplicações – API

Uma API (Interface de Programação de Aplicações) é uma interface ou serviço que permite aos desenvolvedores disponibilizar algum recurso sem que tenha que implementá-lo novamente a cada dispositivo. Maalej e Robillard (2013) definem uma API como um contrato entre o componente que provê uma funcionalidade e o componente que utiliza a funcionalidade (o cliente), permitindo o reuso de bibliotecas e frameworks no desenvolvimento de software.

As APIs estão sendo largamente utilizadas hoje em dia, pois facilita o processo de desenvolvimento de software e permite a utilização de serviços de terceiros essenciais. Existe no mercado por exemplo API para realizar pagamentos (PayPal, Pix, Cielo), fornece localização (Google Maps), interagir com redes sociais (Facebook, Twitter) e com sites de e-commerce (Amazon, Mercado Livre). Ao criar uma API uma empresa pode expandir seus negócios e aumentar a utilização de seu sistema ao oferecer um serviço que atenda uma necessidade específica, e desse modo os sistemas de hoje em dia estão ficando cada vez mais entrelaçados.

À medida que a utilização de APIs vai crescendo, protocolos também vão surgindo. Rodríguez *et al.* (2016) explicita duas arquiteturas que surgiram e se solidificaram ao passar dos anos, que são bastante utilizadas, a arquitetura SOAP e a arquitetura REST, na qual a primeira é provida de uma padronização, enquanto a segunda é mais identificada como um estilo, carece de um padrão bem definido.

2.9.3 Grafana

Grafana é uma aplicação web de código aberto que tem o uso livre sobre a licença Apache 2.0. Grafana permite ao usuário a possibilidade de consultar, receber alertas, visualizar e compreender os dados, não importa onde eles estejam armazenados. Com ele é possível criar, explorar e compartilhar gráficos com outras pessoas. (Informações retiradas do site do distribuidor).

A partir do Grafana é possível fazer consultas nos principais bancos de dados existentes, sendo necessário apenas instalar um plug-in para adicionar a funcionalidade para o determinado banco.

2.9.4 Licenças de Software

Todo software comercializado ou distribuído necessita de um documento que explica até onde vão os limites de uso do produto, esse documento é a licença de software. Existem vários tipos de licenças, entre elas:

- Licença aquisição perpétua: Ao se comprar o software ele se torna seu, é o modelo mais antigo de licença;
- Licença de uso: o usuário tem direito de uso ao software por determinado prazo em apenas uma máquina;
- Licença de Software Livre: os usuários são livres para usar, copiar, distribuir, estudar, alterar, e melhorar o software. Pode-se usar o software da forma que bem entender no limite de que não seja prejudicado a liberdade do próximo de utilizar o software da mesma maneira.
- Licença de Código Aberto: o código é aberto para todos e não é cobrado pelo uso, mas podem existir algumas restrições, pois a licença de código aberto diferencia da licença de software livre;

Existem também vários modelos já prontos de licenças, as mais utilizadas são:

- GNU GPL: Licença de software livre que protege o direito de cópia, ou seja, todo software que for derivado do software sob a GPL terá que ter a mesma licença;
- APACHE 2.0: Licença de software livre que não protege o direito de cópia, ou seja, um software pode ser distribuído sob outra licença caso o código original seja modificado, mas as partes não alteradas deverão ter o código fonte liberado;
- MIT: O Software pode ser tratado sem restrições de uso, podendo ser modificado, distribuído e ser incorporado tanto a software livre quanto a software proprietário.

2.9.5 JavaScript

JavaScript é uma linguagem de programação de alto nível focada principalmente em tecnologias web. É uma linguagem interpretada, com conceitos de orientação a objetos e com foco na execução assíncrona.

JavaScript foi inicialmente criada para ser executada juntamente com HTML e CSS para fornecer páginas mais interativas e complexas aos clientes. Todavia, com

o aumento da popularidade recentemente foram criadas tecnologias que executam essa linguagem no lado do servidor, desse modo, já é possível construir um site totalmente com JavaScript como linguagem de programação.

A ferramenta mais utilizada para executar JavaScript no lado do servidor é o Node.js, mas existem outras tecnologias como React.js para criar páginas web totalmente em JavaScript.

2.10 Banco de dados

2.10.1 Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD)

Hoje em dia qualquer sistema computacional que deseja trabalhar com dados de forma eficiente necessita usar um Sistema Gerenciador de Banco de Dados. Um SGBD é um software que provê uma forma conveniente e efetiva de definir, armazenar e recuperar informações em um banco de dados (BHOJARAJU, KOGANURMATH;2003).

Um SGDB precisa seguir com um modelo lógico de dados, que define como as informações estão interligadas e são armazenadas. Existem vários modelos que podem ser usados para definir um banco de dados, sendo o mais utilizado atualmente o modelo de dados relacional.

O SGBD utilizado no projeto foi o MySQL que é implementado usando o modelo lógico de dados Relacional e possui licença GNU GPLv2 de uso livre e gratuito.

2.10.2 Modelo de Dados

Ao se implementar um banco de dados em um sistema, é importante ater-se aos modelos de dados que serão utilizados, pois são eles que definem como as informações serão armazenadas e como estarão relacionadas.

No projeto foram utilizados o Modelo Relacional e o Modelo Entidade Relacional, que são discutidos abaixo.

2.10.2.1 Modelo Relacional

O Modelo Relacional define como os dados são armazenados no banco de dados. É o modelo para banco de dados mais utilizado atualmente por revelar-se o

mais adequado ao solucionar os vários problemas que se colocam no nível da concepção e implementação de base de dados (MEIRA, 2013).

Nesse modelo são definidas Relações (Tabelas), que são as estruturas principais do modelo. Nas relações existem os atributos, que podem ser vistos como as colunas das tabelas. E cada linha da tabela é chamada de tupla.

Os SGBDs que implementam o modelo relacional, como é o caso do MySQL, normalmente usam a linguagem SQL (Linguagem de Consulta Estruturada), caracterizada pela simplicidade, facilidade e pela maturidade, por ser largamente utilizada.

2.10.2.2 Modelo Entidade Relacional (MER)

O MER define como os dados são representados e ajuda a descrever e definir o processo de negócio. Normalmente utilizada para banco de dados, mas pode ser usado em outras situações. É o mais utilizado pela maior facilidade de entendimento e pela facilidade de implementação em um banco de dados relacional, o tipo de banco de dados mais utilizado.

Esse modelo visa criar uma abstração simples dos dados para que se chegue mais próximo da vida real. São definidas entidades, que representam algum objeto da vida real, essas entidades possuem características e podem estar relacionadas com outras entidades. (ELMASRI, NAVATHE; 2005).

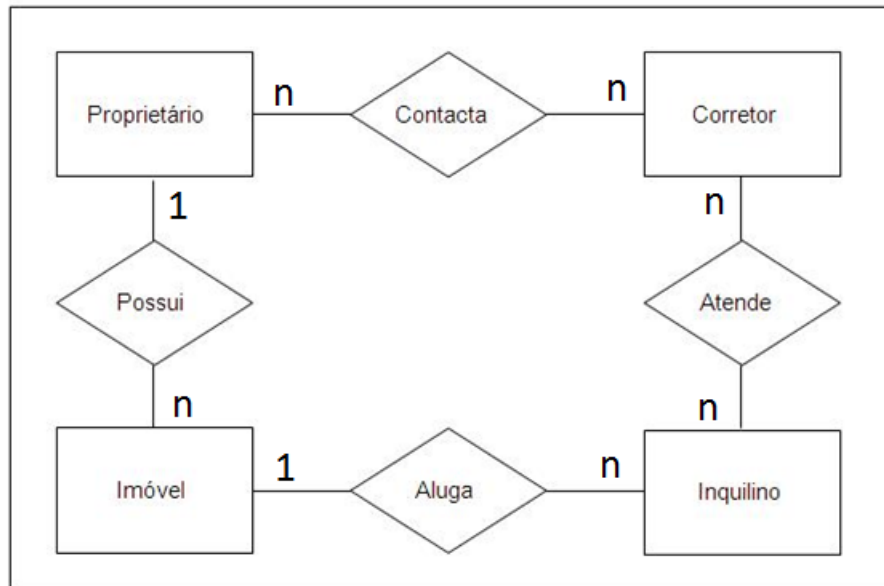
Para implementar um banco de dados relacional a partir do MER, é criado uma tabela para cada entidade, cada característica é definida como um atributo, e os relacionamentos são criados ao se transferir uma chave de uma tabela para outra.

Para criar relacionamentos entre entidades, é necessário existir uma cardinalidade entre elas, definindo de que forma o relacionamento é realizado. Para tal, existem as cardinalidades:

- Um para Um: onde uma instância entidade está relacionada somente com uma instância de outra entidade;
- Um para Vários: uma instância de uma entidade está relacionada com várias instâncias de outra entidade;
- Vários para Vários: uma instância de uma entidade está relacionada com várias instâncias de outra entidade, e também o contrário.

O modelo pode ser representado por meio de diagramas, chamados de diagramas ER, que são utilizados principalmente no processo de criação do projeto de banco de dados. A **Figura 8** apresenta um exemplo de um diagrama ER.

Figura 8 – Exemplo de Diagrama ER



Fonte: Retirado do site ProjetoFical ²

2.10.3 Normalização de Dados

Para garantir que um banco de dados relacional esteja bem projetado, evitando possíveis anomalias como redundância de informações ou lentidão em pesquisas, foi definido um método para que os dados estejam organizados da melhor forma possível nas relações.

A normalização foi utilizada no projeto para tornar o sistema mais eficiente, tendo em vista a grande quantidade de dados que será armazenado.

A normalização é definida por Bahmani *et al.* (2010) como um método que cria um conjunto de tabelas relacionais com o acúmulo mínimo de dados redundantes que podem ser modificados consistentemente e corretamente. E essa normalização existe primariamente em 3 formas ou níveis:

- 1NF: Primeiro nível de normalização. Os dados existem de forma atômica na linha, onde cada atributo possui apenas um valor por linha;

² Disponível em: <https://projtofiscal.com.br/o-que-e-um-diagrama-entidade-relacionamento>, Acesso em: 29 mar. 2021.

- 2NF: Cada atributo de uma tabela precisa ser funcionalmente dependente de um ou mais atributos chaves;
- 3NF: Nenhum atributo deve depender funcionalmente de outro que não seja a chave primária.

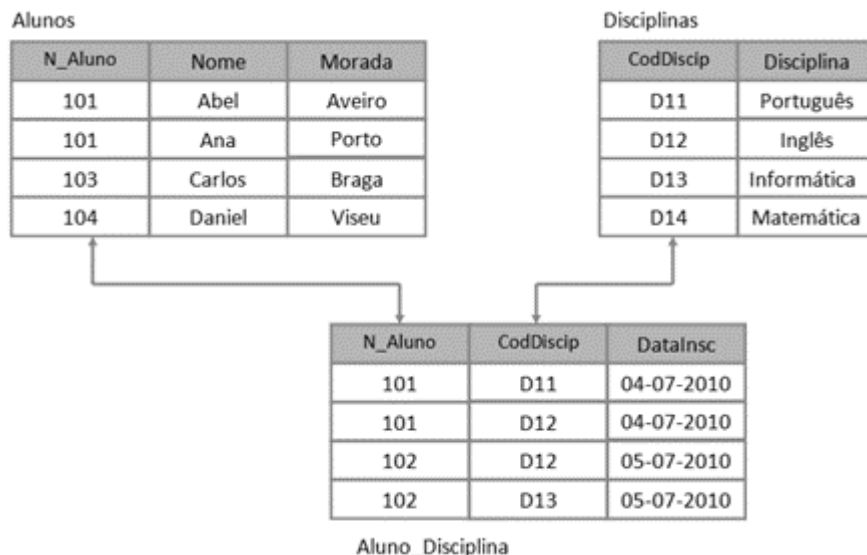
Na **Figura 9** é apresentado um exemplo de banco de dados desnormalizado e na **Figura 10** um exemplo de banco de dados normalizado na 3NF.

Figura 9 – Exemplo de Banco de Dados Desnormalizado

CodCliente	Cliente	Morada	Encomendas			
			N_Enc	Data	Produto	Quantidade
C01	Aníbal	Lisboa	1	2010-05-25	Ananás	10
			5	2010-05-30	Cebolas	20
C02	Belmiro	Braga	3	2010-05-26	Bananas	30
C03	Casimiro	Coimbra	2	2010-05-25	Tomates	50
			4	2010-05-26	Cebolas	20

Fonte: Postagem do Blog FilipaCardosoBlog³

Figura 10 – Exemplo de Banco de Dados Normalizado



Fonte: Postagem do Blog FilipaCardosoBlog⁴

³ Disponível em: <https://filipacardosoblog.wordpress.com/normalizacao-de-uma-base-de-dados-tres-formas-normais/>, Acesso em: 30 mar. 2021.

⁴ Disponível em: <https://filipacardosoblog.wordpress.com/normalizacao-de-uma-base-de-dados-tres-formas-normais/>, Acesso em: 30 mar. 2021.

2.10.4 MySQL

MySQL é um Sistema Gerenciador de Banco de Dados Relacional de código aberto. Foi desenvolvido pela Oracle Corporation e possui duas distribuições do mesmo produto, o MySQL Community Edition e o MySQL Enterprise Edition.

O MySQL Community foi a edição utilizada no projeto. É um software open-source com licença livre, sob os termos da GNU GPL. A principal diferença da edição Enterprise é o uso gratuito e alguns recursos de alta complexidade que não estão disponíveis, mas que por conta dos requisitos do projeto não serão necessários.

O MySQL é um dos SGBDs mais utilizados mundialmente, além de ser uma comunidade altamente ativa é usado por grandes instituições como Facebook, NASA, Nokia. O site do distribuidor define o MySQL como *“um software que oferece um servidor de banco de dados SQL, rápido, multitarefas, multiusuário e robusto”*.

MySQL Community disponibiliza dois produtos que foram utilizados no projeto, o MySQL Server e o MySQL Workbench.

O MySQL Server é o serviço principal, onde está localizado o Banco de Dados propriamente dito.

O MySQL Workbench é uma ferramenta que torna o processo de desenvolvimento do banco de dados mais rápido, além de facilitar o gerenciamento. Em relação a isso, foi retirado do site do distribuidor as principais funcionalidades que essa ferramenta disponibiliza:

- Desenvolvimento SQL: Auxilia no processo de criação de códigos para consultas, e inserções, criação de tabelas, entre outros relacionados à linguagem;
- Modelação de Dados: Permite a criação do esquema gráfico do banco de dados, seguindo os conceitos do Diagrama Entidade-Relacionamento;
- Administração do Servidor: Mostra alguns relatórios dos servidores ativos, além de poder executar funções administrativas, como criação de usuários e de banco de dados;
- Migração dos Dados: Disponibiliza uma ferramenta para facilitar o processo de migração de dados entre bancos;

MySQL foi o sistema escolhido para o projeto por conta dos seguintes motivos:

- Preço: Por ser um software livre não há custos;

- Facilidade: A instalação e a configuração são facilitadas pelo assistente de instalação;
- MySQL Workbench: Ferramenta que facilita a utilização e administração do banco de dados, além de fornecer um recurso para modelagem;
- Comunidade: Por ser muito utilizado mundialmente, todos os problemas se encontram quase totalmente resolvidos pela grande comunidade;
- Qualidade: Por ter uma grande empresa como apoio (a Oracle), o MySQL possui a confiabilidade de um bom banco de dados, além de poucos problemas;

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho foi elaborado em 5 etapas, listadas nos tópicos a seguir:

3.1 Biodigestor Batelada

A primeira etapa se dá na modelagem, adaptação e construção de um modelo de biodigestor artesanal do tipo batelada que possa ser utilizado em ensaios laboratoriais.

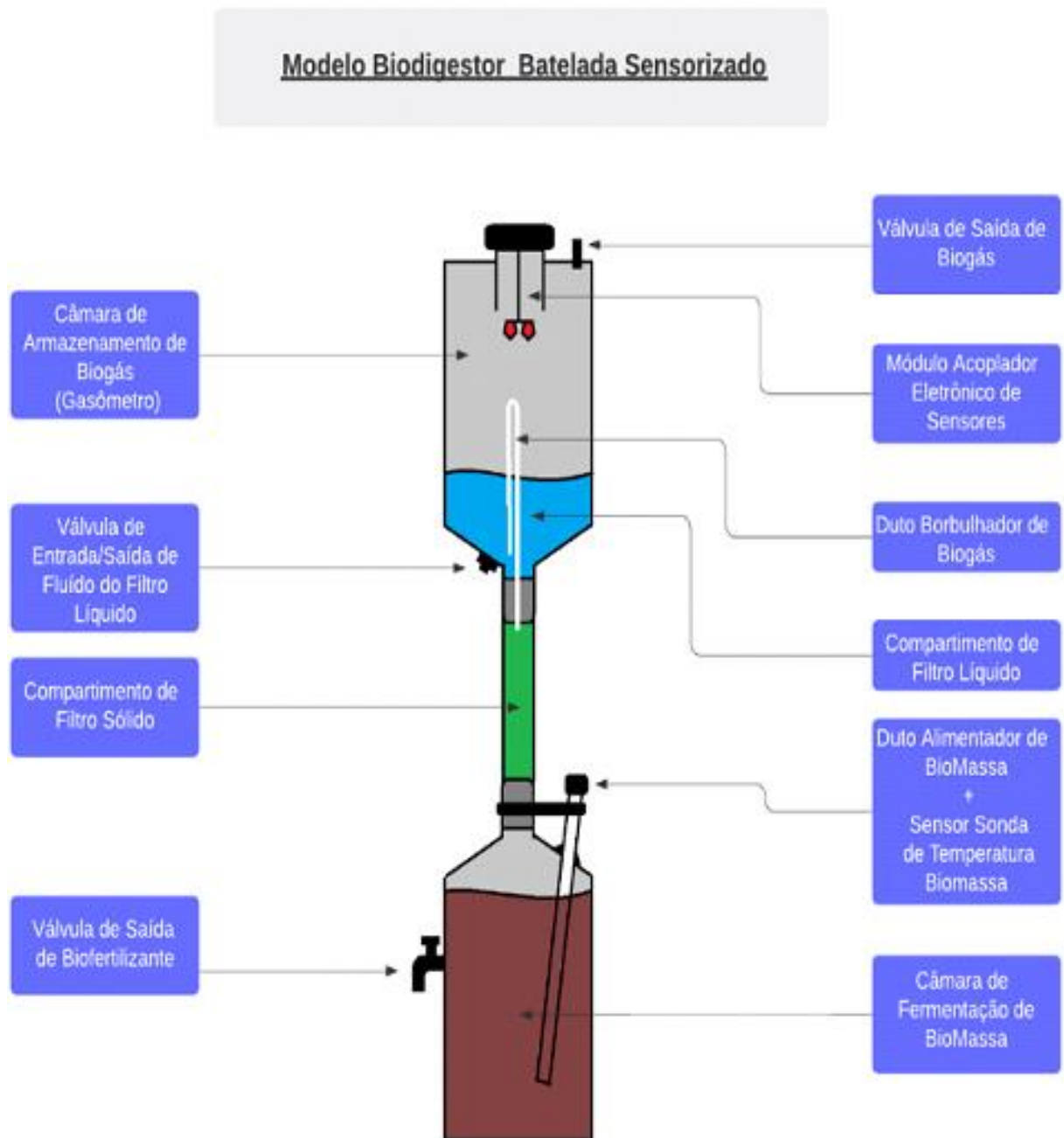
3.1.1 Modelagem do Biodigestor Batelada

O biodigestor deve possuir as seguintes características principais:

- Preservar as condições necessárias para a ocorrência do processo de biodigestão com máxima eficiência possuindo os seguintes elementos: ambiente anaeróbico, recipiente de carga de biomassa primária, recipiente de descarga biomassa processada na forma de biofertilizante, recipiente de biodigestão, recipiente de armazenamento de biogás (gasômetro);
- Possuir reservatórios para fácil inserção e remoção de filtros biológicos, sejam eles na forma sólida ou na forma líquida (dispositivo de borbulhamento para lavagem dos gases em líquido filtrante);
- Possuir acoplamento com dispositivo sensor para monitoramento de parâmetros físicos, químicos e biológicos do ambiente interno ao biodigestor.
- Construir quatro protótipos idênticos, para realização de ensaios simultâneos com utilização de diferentes tipos de elementos filtrantes para fins de análise de desempenho dos filtros.
- Utilizar materiais de baixo custo com o intuito de viabilizar a sustentabilidade econômica para aplicação do projeto em pequenos agricultores da zona rural.

Os trabalhos elencados nesta fase resultaram criação do modelo apresentado na **Figura 11**.

Figura 11 – Modelo do Biodigestor Batelada



Fonte: Autor (2021)

Após a aplicação do modelo, os protótipos foram produzidos conforme apresentado na **Figura 12**.

Figura 12 – Fotografia dos protótipos de biodigestor



Fonte: Autor (2021)

3.1.2 Construção do Biodigestor Batelada

Para a construção do biodigestor do tipo batelada de laboratório, compatível com o sistema de monitoramento (no qual foi denominado neste projeto de biodigestor UNIBIO), foram utilizados os componentes conforme apresentados no **Quadro 3**.

Quadro 3 – Componentes utilizados no biodigestor batelada

Materiais utilizados na construção de 1(um) biodigestor UNIBIO com porta-filtros e gasômetro.

Item	Descrição	Qtd.	Métrica	Valor do Item (R\$)	Valor Total do Item (R\$)	Imagem
1	Garrafão de Água em Policarbonato Cristal 20 L – com prazo de validade vencido (Reciclado)	2	Unidade	3,00	6,00	
2	Tubo de PVC Linha Esgoto 50 mm	1	Metro	10,00	10,00	
3	Adaptador de PVC Linha Água 25 mm x ¾" Soldável e Rosca	1	Unidade	2,50	2,50	
4	Luva de PVC Linha Água 25 mm x ¾" Soldável e Rosca	1	Unidade	2,50	2,50	
5	Bucha de Redução Longa para Esgoto 50 mm x 40 mm	2	Unidade	4,00	8,00	
6	Luva para Esgoto simples 50 mm	2	Unidade	3,00	6,00	
7	Registro Esfera PVC Soldável 25 mm com Borboleta	1	Unidade	8,00	8,00	

Item	Descrição	Qtd.	Métrica	Valor do Item (R\$)	Valor Total do Item (R\$)	Imagem
8	Joelho PVC Linha Água 25 mm soldável 90°	1	Unidade	1,50	1,50	
9	Tubo de PVC Linha Água 25 mm Soldável	0,1	Metro	4,00	0,40	
10	Mangueira de PVC flexível transparente parede 8 mm – Parede interna 5/16"	1	Metro	3,00	3,00	
11	Parafuso de telha 30 cm diâmetro 5/16"	1	Unidade	2,50	2,50	
12	Cantoneira metal em L- 2 cm x 2 cm	4	Unidade	0,50	2,00	
13	Parafuso fenda niquelado 1/4" x 3 cm com porca e arruela	8	Unidade	1,50	12,00	
14	Conexão Registro de Gás Alta Pressão 3/8"	1	Unidade	22,00	22,00	

Item	Descrição	Qtd.	Métrica	Valor do Item (R\$)	Valor Total do Item (R\$)	Imagem
15	Tubo de PVC Linha Esgoto 100 mm	0,2	Metro	14,00	2,80	
16	Fita Telada Fibra de Vidro 48 mm	0,2	Metro	6,00	1,20	
17	Cola Adesivo Plástico PVC 75 g	1	Unidade	4,50	4,50	
18	Massa Adesiva Epóxi Bicomponente 100 g	1	Quilo	8,00	8,00	
19	Resina Acrílica Cristal	0,5	Litro	22,00	11,00	
20	Adesivo Selante a base de poliuretano PU40 310 ml	0,5	Unidade	18,00	9,00	
21	Tinta Esmalte Preto Fosco – Base de Água	0,2	Litro	28,00	5,60	

Item	Descrição	Qtd.	Métrica	Valor do Item (R\$)	Valor Total do Item (R\$)	Imagem
22	Tinta Esmalte Branco – Base de Água	0,2	Litro	28,00	5,60	
23	Torneira plástica para Jardim 1/2"	1	Unidade	3,00	3,00	
Custo Total para 1(Um) Biodigestor UNIBIO:						R\$ 137,10

Fonte: Autor (2021)

Para o projeto foram construídas quatro unidades idênticas de biodigestores. Em cada biodigestor foi aplicado uma combinação diferente de filtros, que são utilizados na filtragem de gás gerado no processo de biodigestão. O **Quadro 4** apresenta o custo dos biodigestores para o projeto.

Quadro 4 – Tabela resumo de preço dos biodigestores

Custo Unitário do Biodigestor	Quantidade de Biodigestores	Valor Total Custo Biodigestores
R\$ 137,10	4	R\$ 548,40

Fonte: Autor (2021)

3.1.2.1 Primeira etapa – higienização dos garrafões de 20 litros

Para garantir a economicidade do projeto e por questões de sustentabilidade ambiental, os garrafões utilizados foram adquiridos em um depósito de reciclagem, tendo em vista que esses materiais derivados do petróleo iriam para o descarte.

Levando em consideração que estes garrafões estavam armazenados em condições insalubres, havendo alto risco de contaminação por agentes biológicos, foi

necessário haver, antes de qualquer manuseio, a lavagem, higienização e desinfecção dos mesmos com água corrente, sabão detergente líquido e água sanitária. A **Figura 13** apresenta os garrafões sendo preparados para a higienização.

Figura 13 – Lavagem dos garrafões



Fonte: Autor (2021)

3.1.2.2 Segunda etapa – Preparação dos garrafões inferiores – Câmara de Biodigestão

O compartimento armazenador de biomassa dos biodigestores, onde será realizada a biodigestão, foi construído de forma que se tornasse um ambiente anaeróbio, isento de luz e hermeticamente fechado.

Inicialmente foi realizado um furo com broca serra-copo de 51 mm na parede da parte superior do garrafão, no qual será inserido um tubo de PVC linha esgoto de 50 mm de diâmetro. O cano entrará bem apertado pelo furo, facilitando a tarefa de vedação e impermeabilização dos elementos colantes. O 1 mm de diferença entre a bitola da serra-copo (51 mm) e a bitola do tubo de PVC para esgoto (50 mm) foi preenchido pela espessura da parede do tubo, fazendo com que o encaixe do tubo no garrafão ficasse sem folgas e brechas. Conforme apresentado na **Figura 14**, esse furo tem a finalidade de ser o alimentador de biomassa do biodigestor.

Em seguida foi realizado outro furo no lado simetricamente oposto do furo inicial do alimentador de biomassa, porém na parede lateral do garrafão, com uma

broca serra-copo de 25 mm. Esse furo terá como objetivo o acoplamento da válvula-registro da saída do biofertilizante processado a partir da biomassa. O mesmo ficou conforme apresentado na **Figura 15**.

Figura 14 – Furo no garrafão, em cima.



Fonte: Autor (2021)

Figura 15 – Furo no garrafão, em baixo.



Fonte: Autor (2021)

Esse processo foi repetido em quatro garrafões de 20 L de polycarbonato para água, que servirão como compartimento de biomassa dos quatro protótipos de

biodigestores sensorizados. Esses protótipos serão utilizados na etapa de experimentos para o estudo aplicado de filtros em biodigestores.

Figura 16 – Todos os garrafões furados.



Fonte: Autor (2021)

Posteriormente foi utilizado o item “Tubo PVC Esgoto 50 mm de 1 m”, no qual será recortado, com o auxílio de um arco de serra, um pedaço de tubo de 40 cm de comprimento, no qual será utilizado como duto de entrada do alimentador de biomassa do biodigestor. O tubo ficou conforme apresentado na figura **Figura 17**. O tubo recortado de 40 cm foi inserido no furo superior do garrafão ficando 10 cm externos ao garrafão, conforme apresentado na **Figura 18**.

Figura 17 – Medida do tubo de PVC



Fonte: Autor (2021)

Figura 18 – Tubo encaixado no garrafão.



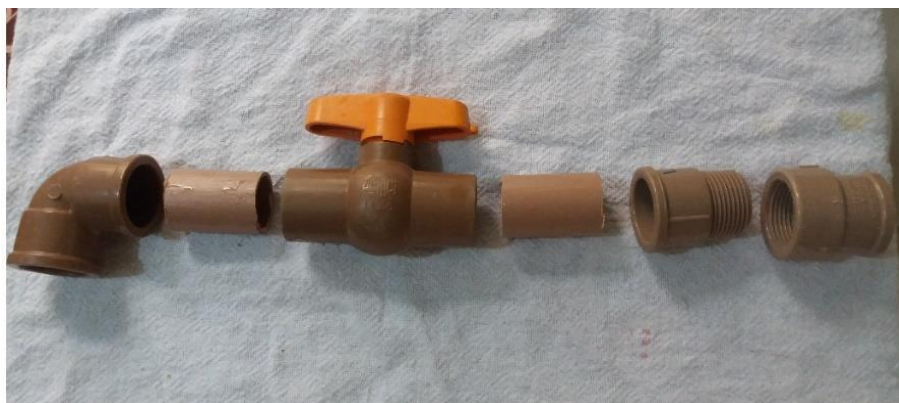
Fonte: Autor (2021)

Os passos a seguir tratam da montagem da válvula-registro de saída de biofertilizante, no qual serão utilizados os componentes a seguir:

- Item 3 – Adaptador de PVC Linha Água 25 mm x $\frac{3}{4}$ " Soldável e Rosca – 1 unidade
- Item 4 – Luva de PVC Linha Água 25 mm x $\frac{3}{4}$ " Soldável e Rosca – 1 unidade
- Item 7 – Registro Esfera PVC Soldável 25 mm com Borboleta – 1 unidade
- Item 8 – Joelho PVC Linha Água 25 mm soldável 90° – 1 unidade
- Item 9 – Tubo de PVC Linha Água 25 mm Soldável – 1 unidade
- Item 17 – Cola Adesivo Plástico PVC 75g – 1 unidade

Desses itens, 10 cm do item 9 (tubo de PVC 25mm soldável) foram divididos, com o auxílio do arco de serra, em dois pedaços de 4cm. Os mesmos foram utilizados para a junção das conexões do tipo luva, os demais itens ficaram dispostos conforme apresentado na **Figura 19**.

Figura 19 – Válvula da saída da biomassa desmontada



Fonte: Autor (2021)

Após a junção e soldagem, com a cola PVC (item 17), das conexões indicadas, o conjunto válvula-registro para saída do biofertilizante ficou conforme apresentado na **Figura 20**. Foi realizado um recorte lateral na parede de um garrafão danificado para exemplificar como ocorreu a sustentação do registro no garrafão, conforme apresentado na **Figura 21**.

Figura 20 – Válvula da saída de biomassa, recorte lateral



Fonte: Autor (2021)

Figura 21 – Exemplo da Sustentação da Válvula de Saída do Biofertilizante



Fonte: Autor (2021)

A utilização dos itens 3 e 4 (adaptador e luva PVC 25 x $\frac{3}{4}$ respectivamente), na fixação do conjunto de registro de saída do biofertilizante ao garrafão, tem a finalidade de garantir uma alta resistência a tração no ponto de junção, e uma melhor resistência contra impactos que o registro venha a receber. Isto garante também que o elemento colante de vedação da junção garrafão-registro tenha maior foco na função de vedação, deixando a função de força de resistência da junção para a fixação por rosqueamento entre os itens 3 e 4. Isto é necessário pois a cada vez que se utiliza a borboleta do registro, se faz uma considerável pressão na junção com o garrafão, e o momento da força acaba se concentrando na junção de rosqueamento, evitando assim danos à cola de vedação e possíveis vazamentos no ponto de junção. O conjunto montado ficou conforme apresentado na **Figura 22**.

Figura 22 – Válvula de saída da biomassa montada.



Fonte: Autor (2021)

Após a montagem do conjunto válvula-registro de saída de biofertilizante ao garrafão de biomassa, o conjunto foi selado contra vazamento hidráulicos com o componente item 20 (Adesivo Selante à base de poliuretano PU40), pois esse tipo de

cola tem bastante aderência ao material do garrafão polycarbonato assim como o material das conexões PVC. Esse material possui também alta flexibilidade, o que é necessário tendo em vista que o conjunto pode sofrer leves movimentações na utilização do registro, assim, evitando trincas nos selantes e possíveis vazamentos do fluido da biomassa. O item 20 além de ter ótima resistência, não possui solventes em sua composição, evitando assim de, ao entrar em contato com a biomassa no ponto de junção, alterar o processo bioquímico da biodigestão.

No passo seguinte foi realizada a montagem das conexões da saída de gases na câmara de fermentação da biomassa, no qual foi utilizada a abertura original do garrafão com a utilização dos itens listados abaixo para realização do acoplamento com o compartimento de filtro sólido. Assim sendo, torna-se possível que essa ligação seja acoplada e desacoplada de forma prática, dessa forma possibilitando a troca dos elementos filtrantes sólidos e a remoção completa, de forma simplificada, de toda a biomassa na câmara de biodigestão.

- Item 5 – Bucha de Redução Longa para Esgoto 50x40 mm
- Item 6 – Luva para Esgoto simples 50 mm
- Item 17 – Cola Adesivo Plástico PVC 75 g
- Item 20 – Adesivo Selante à base de poliuretano PU40 310 ml

Figura 23 – Exemplo da Montagem das Conexões de Saída de Gás



Fonte: Autor (2021)

Inicialmente, a parte de 40 mm do item 5 (Bucha de Redução de PVC de 50 mm para 40 mm) foi conectada à boca do garrafão de forma apropriada. Esse componente foi escolhido depois de ser pesquisado várias opções de objetos de baixo custo e fácil acesso no mercado, sendo a opção que se encaixou com ajuste mais preciso no diâmetro interno padrão da boca dos garrafões de água 20 L, facilitando o trabalho de vedação e fixação dos materiais colantes. Tendo em vista, também, que nesta junção têm-se a presença de gases voláteis em quantidade considerável de pressão gasosa, é importante que esta junção tenha um adequado grau de firmeza e vedação, sendo um requisito atendido para esta conexão.

O item 6(Luva de PVC 50 mm) tem a finalidade de adaptar a saída de gás da câmara de biomassa para a conexão com formato de bolsa de 50 mm com compartimento para anel de borracha vedante, o que deixa esta saída apropriada para o encaixe e desencaixe do compartimento de filtro sólido, que tem, em sua conexão, um tubo PVC de 50 mm.

O adesivo referente ao item 17 (cola PVC) será utilizado para união permanente dos itens 5 e 6 já que esses dois elementos são de material tipo PVC.

O adesivo referente ao item 20 (adesivo selante PU) tem a finalidade de colar e selar hermeticamente a saída do garrafão, que é de material de policarbonato, e o adaptador de 40 mm, que é de material PVC. Esse material colante tem boa aderência com esses dois materiais, além de vir em forma pastosa, o que facilita uma aplicação eficiente e com excelente poder selante para líquidos e gases.

O passo a seguir trata-se da colocação de um suporte fixo de fixação, e travamento do duto do alimentador de biomassa com a estrutura do garrafão de policarbonato. Isso faz com que a força aplicada, em caso de manejo do alimentador ou algum impacto inesperado, no ponto de junção entre o alimentador de biomassa e a câmara de biodigestão seja transferida para o suporte de travamento fixo, aliviando a pressão no elemento colante desses dois materiais.

Esse suporte foi construído com uma resina acrílica do tipo cristal na forma líquida, que, após a aplicação do componente catalisador, transforma-se em uma forma moldável de alta dureza e alta resistência à tração e compressão. Para o molde do suporte, foi utilizado plástico de garrafas PET e fita adesiva. Este suporte foi incluído no projeto, pois, pesquisando vários modelos de biodigestores tipo batelada feito com garrafões de água, percebeu-se que essa junção do alimentador com o corpo do garrafão era um ponto frágil que se rompia facilmente, ocasionando

vazamentos de gases, líquidos e cheiros do biodigestor, comprometendo a performance de todo o processo de biodigestão. O processo de construção do suporte é apresentado na **Figura 24**.

Figura 24 – Processo de Construção do Suporte do Gasômetro



Fonte: Autor (2021)

Após a secagem da resina, que leva 48 horas para atingir uma cura e dureza segura para o manuseio do tambor sem que haja riscos de danificar o suporte fixo, foi feita a colagem e vedação da junção do tubo alimentador com a câmara de biomassa. Para essa junção foi utilizado o item 18 (Massa Adesiva Epóxi Bicomponente), que oferece boa aderência aos materiais de polipropileno e PVC, suporta temperaturas de exposição ao sol e tem ótima resistência à pressão gasométrica no qual será submetido, além de ter ótimo alto grau de dureza o que complementa a fixação realizada pelo suporte fixo de resina. Para aplicação deste elemento colante é necessário lixar as partes que serão fundidas pelo adesivo, processo apresentado na **Figura 25**.

Figura 25 – Vedação da Junção do Tubo Alimentador



Fonte: Autor (2021)

3.1.2.3 Terceira etapa – Construção do Compartimento de Filtro Sólido

Nesta etapa foram preparadas as unidades que são utilizadas para alojamento dos elementos filtrantes dos gases originados da biodigestão, filtros de natureza sólida como esponjas, fibras, tecidos ou materiais granulados que não sejam solúveis em água. Foram utilizados os seguintes materiais:

- Item 2 – Tubo de PVC Linha Esgoto 50 mm
- Item 16 – Fita Telada Fibra de Vidro 48 mm
- Item 17 – Cola Adesivo Plástico PVC 75 g

Foi retirado do item 2 (Tubo de PVC 50 mm), com um arco de serra, um pedaço de tubo de 25cm de comprimento, que será o invólucro do filtro e terá 20 cm de comprimento de área útil para o alojamento do elemento filtrante, pois 5 cm serão reservados para o acoplamento do filtro com a câmara de biomassa no lado inferior e com o gasômetro pelo lado superior. Também foi retirado um pedaço do mesmo tubo, 2 cm, no qual foi realizado dois cortes transversais ao comprimento para a remoção de 3 mm da parede do tubo, para que o mesmo encaixe internamente ao tubo maior, este pedaço (abraçadeira PVC) terá a função de travamento da tela de fibra que será o limitador do elemento filtrante.

Foi recortado com uma tesoura comum, 2 pedaços de 10 cm da fita telada de fibra (item 16), processo apresentado na **Figura 26**.

Figura 26 – Recorte do Elemento Filtrante

Fonte: Autor (2021)

Em seguida, a parte interna de uma das extremidades do tubo e a abraçadeira de PVC foram banhadas com o adesivo plástico PVC (item 17) e as duas fitas teladas foram encaixadas na extremidade do tubo do filtro formando uma dupla camada paralela, encaixou-se a abraçadeira no interior da extremidade do tubo de forma que as fitas teladas ficassem travadas. Após 5 minutos de secagem do adesivo PVC, as extremidades da fita telada foram aparadas com uma tesoura simples. O compartimento de filtros sólidos ficou pronto conforme apresentado na **Figura 27**. O processo foi repetido mais 3 vezes para a construção de quatro elementos idênticos do filtro sólido que serão utilizados nos protótipos do experimento com os biodigestores.

Figura 27 – Compartimentos de Filtros Sólidos Prontos

Fonte: Autor (2021)

3.1.2.4 Quarta etapa – Preparação dos Garrafões Superiores – Câmara de Armazenamento de Biogás (Gasômetro).

Nesta etapa é feita a montagem da câmara de armazenamento de biogás, que trataremos neste tópico apenas por gasômetro. Serão utilizados os seguintes materiais:

- Item 1: Garrafão de Água em Policarbonato Cristal 20 L – com prazo de validade vencido (Reciclado).
- Item 5: Bucha de Redução Longa para Esgoto 50x40mm.
- Item 6: Luva para Esgoto simples 50mm
- Item 10: Mangueira de PVC flexível transparente parede 8mm – Parede interna 5/16"
- Item 11: Parafuso de telha 30cm diâmetro 5/16"
- Item 12: Cantoneira metal em L- 2cm x 2 cm
- Item 13: Parafuso fenda niquelado 1/4" x 3cm com porca e arruela
- Item 14: Conexão Registro de Gás Alta Pressão 3/8"
- Item 15: Tubo de PVC Linha Esgoto 100mm
- Item 23: Torneira plástica para Jardim 1/2"

O garrafão (item 1) recebeu 3 perfurações numeradas em 1,2,3 conforme marcações apresentadas na **Figura 28**. A perfuração de número 1 tem a finalidade de receber o item 23 (Torneira plástica para jardim) que terá o objetivo de possibilitar a troca e reposição do fluido do filtro líquido, que, no modelo do gasômetro, está denominada de "Válvula de Entrada/Saída de Fluidos do Filtro Líquido". Essa perfuração foi realizada com uma broca serra-copo de diâmetro de 20 mm.

A perfuração de número 2 tem a finalidade de receber o tubo de PVC 100 mm de 20 cm de comprimento (item 15), que terá a finalidade de acoplar o modulo de sensores de monitoramento eletrônico. O diâmetro da perfuração número 2 é de 100 mm. Devido à dificuldade de encontrar uma broca serra-copo com esse diâmetro, essa perfuração foi realizada manualmente com uma faca de mesa serrilhada.

Já para a perfuração de número 3, esta foi realizada com uma broca de 3/8". A finalidade desta perfuração é para que seja feito o acoplamento do Item 14 (Conexão Registro de Gás Alta Pressão 3/8) que terá a função de realizar a liberação do biogás da câmara do gasômetro para um ambiente externo ao biodigestor.

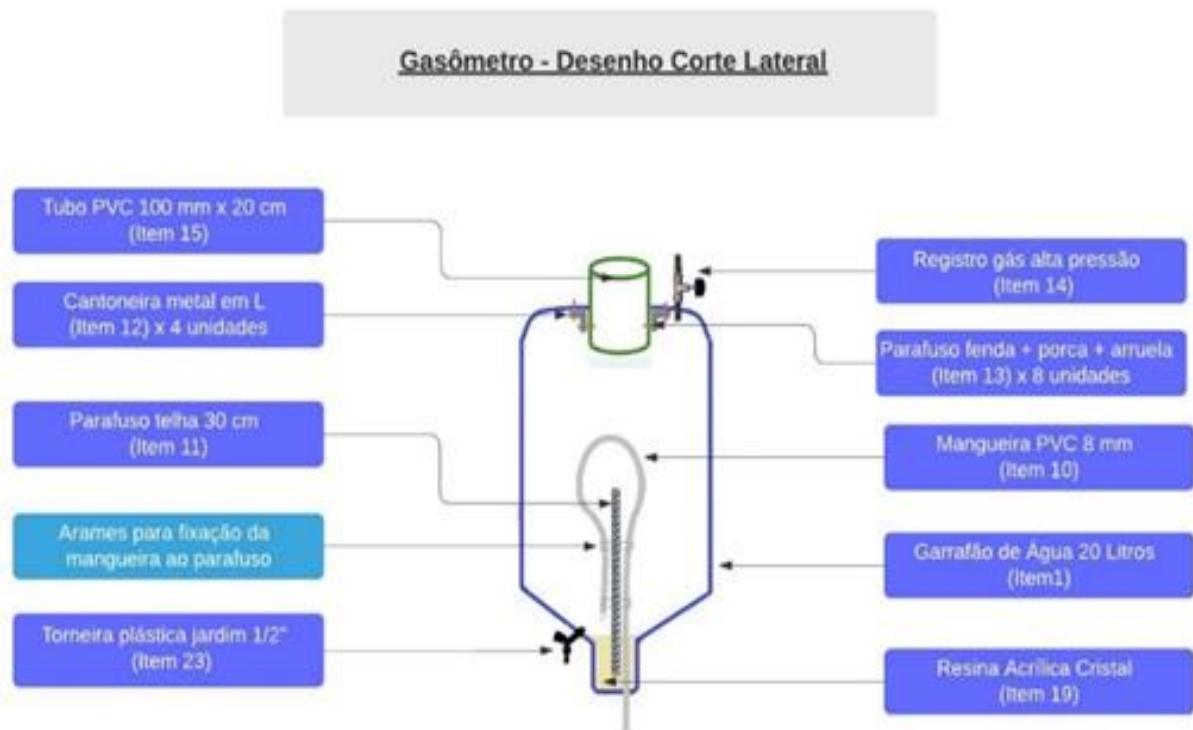
Figura 28 – Marcações dos Recortes dos Gasômetros



Fonte: Autor (2021)

Após a realização indicada no passo anterior, a montagem dos componentes no gasômetro ocorreu conforme diagrama de montagem apresentado na **Figura 29**.

Figura 29 – Esquema de Montagem do Gasômetro



Fonte: Autor (2021)

Após a montagem do gasômetro conforme apresentado na **Figura 29**, os componentes fixados nas perfurações de numeradas em 1, 2 e 3, conforme apresentados na **Figura 28** receberam uma colagem com o adesivo selante a base de poliuretano (item 20). A parte superior do garrafão recebeu uma camada de Resina Acrílica Cristal (item 19) com o intuito de reforçar mecanicamente a selagem realizada nas junções superiores, além de uniformizar a superfície do gasômetro evitando o acúmulo de água em caso de exposição a chuvas

O gargalo do garrafão, no qual terá a função de entrada dos gases oriundos da câmara de biodigestão, recebeu uma conexão com o Item 5 (Bucha de Redução Longa 50x40 mm) e com o Item 6 (Luva simples 50 mm) idêntico ao procedimento apresentado na **Figura 23**. O processo de vedação ocorreu com a aplicação do item 19 (Resina Acrílica Cristal) e terá além da função de vedar a junção entre itens 1, 5 e 6 do gasômetro, a função de dar sustentação ao Item 11 (Parafuso de telha 30 cm) e a função de vedação do item 10 (Mangueira de PVC flexível). Para moldagem da resina foram utilizadas latinhas de alumínio descartáveis. A **Figura 30** apresenta o resultado do processo.

Figura 30 – Vedação dos Gasômetros



Fonte: Autor (2021)

3.1.2.5 Quinta etapa – Acabamentos

Na quarta e última etapa foram realizadas as pinturas e montagem das partes do biodigestor e foram utilizados os seguintes materiais:

- Item 21 – Tinta Esmalte Preto Fosco – Base de Água
- Item 22 – Tinta Esmalte Branco – Base de Água

A tinta esmalte preto fosco (item 21) foi utilizada para pintura do garrafão onde ficará a câmara de biodigestão, essa pintura terá a função de garantir que, no ambiente interno da câmara, não haja presença de luz solar quando o biodigestor estiver exposto ao sol, além de que, a cor preta-fosca, tem uma maior retenção de calor, fazendo com que a biomassa se mantenha mais aquecida, melhorando assim a performance do processo de biodigestão.

A tinta esmalte branco (Item 22) foi utilizada para pintura na câmara do gasômetro, que terá a função de proteger o material das paredes do garrafão. A tinta branca tem uma função reflexiva de luz solar, evitando assim o acúmulo de calor no garrafão evitando assim que os sensores eletrônicos que estão inseridos no gasômetro recebem alta carga calorífica.

Observa-se que, para as pinturas foram utilizadas tintas esmalte com base de água, pois no experimento foram feitos ensaios com tintas esmalte de base solvente, e essas tintas apresentaram problemas de microfissuras no material plástico dos garrafões, além de reagir quimicamente com a cola a base de poliuretano causando perfurações no adesivo. O ensaio com tintas esmalte à base de água não apresentaram nenhum problema com os materiais aplicadas no projeto, sendo o fator determinante para a escolha desse tipo de tinta para o acabamento dos biodigestores.

O resultado do biodigestor batelada sensorizado ficou conforme apresentado na **Figura 31**.

Figura 31 – Resultado do Biodigestor Batelada



Fonte: Autor (2021)

3.2 Módulos Sensores

3.2.1 Modelagem dos Módulos Sensores

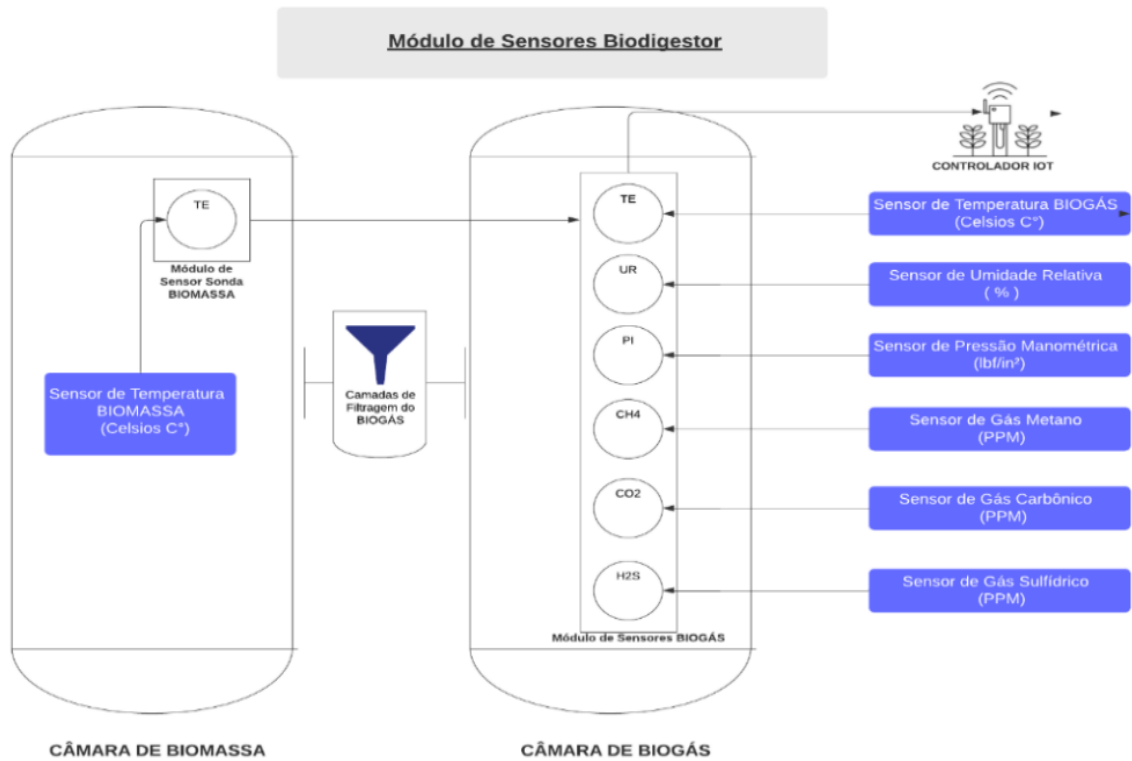
Na segunda etapa, foram desenvolvidos os módulos acopladores de sensores eletrônicos para serem adaptados nos biodigestores. Alguns requisitos foram observados no projeto desses módulos:

- O formato de módulo acoplador de sensores eletrônicos, projetados para a utilização nos protótipos do UNIBIO, foram idealizados de forma que atenda aos diversos modelos de biodigestores existentes, como os de modelo indiano, canadense, chinês e batelada (modelo utilizado no projeto). Enfatiza-se também que os acoplamentos dos módulos de sensoriamento devem ser compatíveis com biodigestores já em funcionamento no campo de trabalho;
- É necessário fácil acesso para manutenção, inspeção e troca dos sensores;
- Devem ser observadas as condições críticas de funcionamento e acoplamento dos módulos, visto que os biodigestores operam em ambientes hostis e estão sujeitos a intempéries como alta exposição ao sol, chuva, ventos, umidade elevada, variações bruscas de temperatura e ambiente corrosivo.

Na **Figura 32** é apresentado o modelo de conexão do módulo acoplador de sensores com a disposição dos sensores eletrônicos que compõem a solução de sensoriamento do biodigestor.

Na **Figura 33** é apresentada a fotografia da construção física do módulo de sensoriamento para aplicação no biodigestor. Ela é dividida em 2 partes: Módulo para montagem na câmara do Biogás (**Figura 33-A**) e Módulo para montagem na câmara de fermentação da biomassa (**Figura 33-B**).

Figura 32 – Modelo de conexão do módulo acoplador



Fonte: Autor (2021)

Figura 33 – Fotografia da construção do módulo de sensoriamento

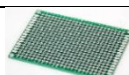


Fonte: Autor (2021)

3.2.2 Construção dos Módulos Sensores

Para construção do Hardware do módulo controlador IoT foram utilizados os componentes apresentados no **Quadro 5**.

Quadro 5 – Materiais utilizados na construção dos módulos sensores UNIBIO

Item	Descrição	Qtd.	Métrica	Valor do Item (R\$)	Valor Total do Item (R\$)	Imagem
1	Sensor de Gás Metano CH ₄ Modelo: MQ4	1	Unidade	25,00	25,00	
2	Sensor de Gás Sulfídrico H ₂ S Modelo: MQ136	1	Unidade	220,00	220,00	
3	Sensor de Gás Carbônico CO ₂ MODELO: MH-Z19B	1	Unidade	280,00	280,00	
4	Sensor de pressão G1/4- 1.2Mpa	1	Unidade	160,00	160,00	
5	Sensor Umidade e temperatura DHT11	1	Unidade	20,00	20,00	
6	Sensor sonda temperatura DS18B20	1	Unidade	28,00	28,00	
7	Keystone Categoria 6 RJ45 Fêmea	2	Unidade	20,00	40,00	
8	Conector Rj45- categoria 6	1	Unidade	2,00	2,00	
9	CAP PVC Linha esgoto 100 mm	1	Unidade	7,00	7,00	
10	CAP PVC Linha esgoto 50 mm	1	Unidade	2,50	2,50	
11	Parafuso de telha 30 cm diâmetro 5/16"	1	Unidade	2,50	2,50	
12	Placa de circuito impresso 4x6 cm	1	Unidade	8,00	8,00	

Item	Descrição	Qtd.	Métrica	Valor do Item (R\$)	Valor Total do Item (R\$)	Imagem
13	Adesivo Selante a base de poliuretano PU40 310 ml	0,5	Unidade	18,00	9,00	
14	Tinta Esmalte Verde – Base de Água	0,2	Litro	28,00	5,60	
Custo total para 1 módulo sensor UNIBIO					R\$ 809,60	

Fonte: Autor (2021)

Para o projeto UNIBIO, serão realizados simultaneamente os ensaios com quatro combinações de filtros distintas. Elas serão aplicadas na filtragem do gás gerado no processo de biodigestão. Outrossim, foram construídas quatro unidades idênticas de módulos sensores, tendo o custo do projeto em biodigestores dispostos conforme apresentado no **Quadro 6**.

Quadro 6 – Tabela resumo de preço dos módulos sensores

Custo Unitário do Módulo Sensor	Quantidade de Módulos Sensores	Valor Total Custo Módulo Sensores
R\$ 809,60	4	R\$ 3238,40

Fonte: Autor (2021)

O módulo de sensores para biodigestor UNIBIO é formado por duas peças para acoplamento em tubos PVC nas bitolas padrão de 100 mm e 50 mm.

No que tange à peça 1, foi montada sobre um CAP de PVC padrão de 100 mm, sendo a responsável por acomodar os sensores que irão fazer a medição dos parâmetros dos gases na câmara do gasômetro. Essa parte utilizará os seguintes itens do **Quadro 5**:

- 1(Sensor Metano)
- 2(Sensor sulfetos)
- 3(Sensor gás carbônico)
- 4(Sensor Pressão)

- 5(Sensor unidade e temperatura)
- 7(Keystone)
- 9(CAP 100mm)
- 11(parafuso 30cm)
- 12(PCI)
- 13(adesivo PU)
- 14(tinta acabamento verde)

Para o processo de montagem, serão colados dois Keystones (item 7), com cola PU90, na parte superior do CAP de 100 mm. Em seguida, deve-se inserir um parafuso de 30 cm no eixo central (item 11). A outra extremidade do parafuso será inserida na placa PCI (item 12), a qual receberá também, por aplicação de solda estanho, os sensores eletrônicos interligados até os Keystone (item 7) por fiação de cobre. A perfuração no CAP para a fixação do parafuso e passagem dos fios deverá ser vedada com o adesivo selante PU40 (item 13). A **Figura 34** apresenta essa montagem.

Figura 34 – Montagem do Módulo Sensor



Fonte: Autor (2021)

Os sensores 1 (Sensor Metano), 2 (Sensor Sulfetos), 3 (Sensor Gás Carbônico), 4 (Sensor Pressão), 5 (Sensor Unidade e Temperatura) deverão ser soldados na placa PCI (item 12) e interligados ao Keystone 1 e 2 (item 7). O Keystone 1 receberá a linha de dados e alimentação oriunda do controlador IoT. Já o Keystone

2 será utilizado para ativar a parte 2 do módulo sensor, sendo essa a parte que será acoplada à câmara de biomassa.

A peça 2, parte do módulo que irá acoplar ao tambor inferior de biomassa, será composta pelos itens:

- 6 (Sensor tipo sonda para temperatura)
- 8 (Conector RJ45)
- 10 (CAP 50 mm)
- 11 (Parafuso 30 cm)
- 13 (Adesivo PU)
- 14 (Tinta acabamento verde)

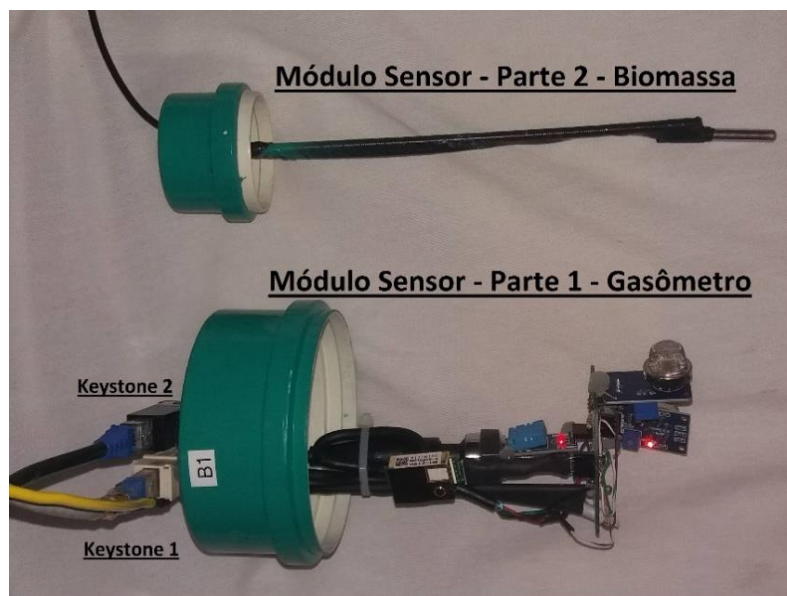
Nesta montagem, uma das extremidades do parafuso de 30 cm (item 11) é fixada no eixo central do CAP 50 mm (item 10). Na outra extremidade dele, será fixada a sonda do sensor de temperatura (item 6). Já na ponta do cabo do sensor de temperatura deverá ser crimpada o conector RJ45 (item 8), no qual esse conector será plugado no Keystone 2 da parte 1 do módulo de sensores. Por fim, o furo no CAP 50 mm para fixação do parafuso deverá ser vedado com o adesivo selante PU40 (item 13). A montagem se dará como apresentado na **Figura 35**.

Figura 35 – Montagem da Parte Acoplada à Câmara de Biomassa



Autor: Autor (2021)

Em seguida foi realizado uma pintura de acabamento nas partes 1 e 2 do módulo de sensores UNIBIO, com o item 14 (tinta esmalte verde), o resultado segue apresentado na **Figura 36**.

Figura 36 – Pintura e Acabamento do Módulo Sensor de Biomassa

Fonte: Autor (2021)

O **Quadro 7** apresenta o diagrama de ligação dos terminais Keystones aos pinos dos sensores. A pinagem é feita de modo que a conexão fique sincronizada com a pinagem do cabo de linha de dados e alimentação que virá do controlador IoT.

Quadro 7 – Diagrama de ligação dos Keystones aos pinos dos sensores

Keystone 1	Keystone 2	Cabo da Linha	Sensor
Pino 1		Branco/verde	Alimentação positiva
Pino 2		Verde	Alimentação negativa
Pino 3		Branco/laranja	Sinal gás metano
Pino 4		Azul	Sinal gás carbônico
Pino 5		Branco-azul	Sinal sulfeto de hidrogênio
Pino 6		Laranja	Sinal temperatura gasômetro
Pino 7		Branco-marrom	Sinal umidade gasômetro
Pino 8		Marrom	Sinal pressão gasômetro
	Pino 1	Branco/verde	Alimentação positiva
	Pino 2	Verde	Alimentação negativa
	Pino 3	Amarelo	Sinal temperatura biomassa

Fonte: Autor (2021)

A **Quadro 8** apresenta o diagrama de interligação elétrica dos módulos sensores UNIBIO com o módulo controlador IoT.

Quadro 8 – Diagrama de interligação elétrica dos módulos sensores

MÓDULO	CÓDIGO	SENSOR	SINAL	PINO SENSOR	PINO ARDUINO	PINO XL4015
Biodigestor 1	MQ4	Gás Metano	Analógico	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				AOUT	A0	
	MQ136	Gás Sulfídrico	Analógico	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				AOUT	A4	
	MHZ-19B	Gás Carbônico	UART	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				TX	D11	
				RX	D10	
	G1/4-1.2	Pressão	Analógico	VCC		VOUT+ (5 V)
				OUT	A8	
				GND		VOUT- (0 V)
	DHT11	Umidade Temperatura	Digital	VCC		VOUT+ (5 V)
				DATA	D2	
				GND		VOUT- (0 V)
	DS18B20	Temperatura	Digital	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				DATA	D6	
Biodigestor 2	MQ4	Gás Metano	Analógico	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				AOUT	A1	
	MQ136	Gás Sulfídrico	Analógico	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				AOUT	A5	
	MHZ-19B	Gás Carbônico	UART	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				TX	D13	
				RX	D12	
	G1/4-1.2	Pressão	Analógico	VCC		VOUT+ (5 V)
				OUT	A9	VOUT- (0 V)
				GND		
	DHT11	Umidade Temperatura	Digital	VCC		VOUT+ (5 V)
				DATA	D3	
				GND		VOUT- (0 V)
	DS18B20	Temperatura	Digital	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				DATA	D7	
Biodigestor 3	MQ4	Gás Metano	Analógico	VCC		VOUT+ (5 V)

MÓDULO	CÓDIGO	SENSOR	SINAL	PINO SENSOR	PINO ARDUINO	PINO XL4015
				GND		VOUT- (0 V)
				AOUT	A2	
				VCC		VOUT+ (5 V)
	MQ136	Gás Sulfídrico	Analógico	GND		VOUT- (0 V)
				AOUT	A6	
				VCC		VOUT+ (5 V)
	MHZ-19B	Gás Carbônico	UART	GND		VOUT- (0 V)
				TX	A13	
				RX	A12	
				VCC		VOUT+ (5 V)
	G1/4-1.2	Pressão	Analógico	OUT	A10	
				GND		VOUT- (0 V)
				VCC		VOUT+ (5 V)
	DHT11	Umidade Temperatura	Digital	DATA	D4	
				GND		VOUT- (0 V)
				VCC		VOUT+ (5 V)
Biodigestor 4	MQ4	Gás Metano	Analógico	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				AOUT	A3	
	MQ136	Gás Sulfídrico	Analógico	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				AOUT	A7	
	MHZ-19B	Gás Carbônico	UART	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				TX	A15	
				RX	A14	
	G1/4-1.2	Pressão	Analógico	VCC		VOUT+ (5 V)
				OUT	A11	
				GND		VOUT- (0 V)
	DHT11	Umidade Temperatura	Digital	VCC		VOUT+ (5 V)
				DATA	D5	
				GND		VOUT- (0 V)
	DS18B20	Temperatura	Digital	VCC		VOUT+ (5 V)
				GND		VOUT- (0 V)
				DATA	D9	

Fonte: Autor (2021)

3.3 Controlador IoT

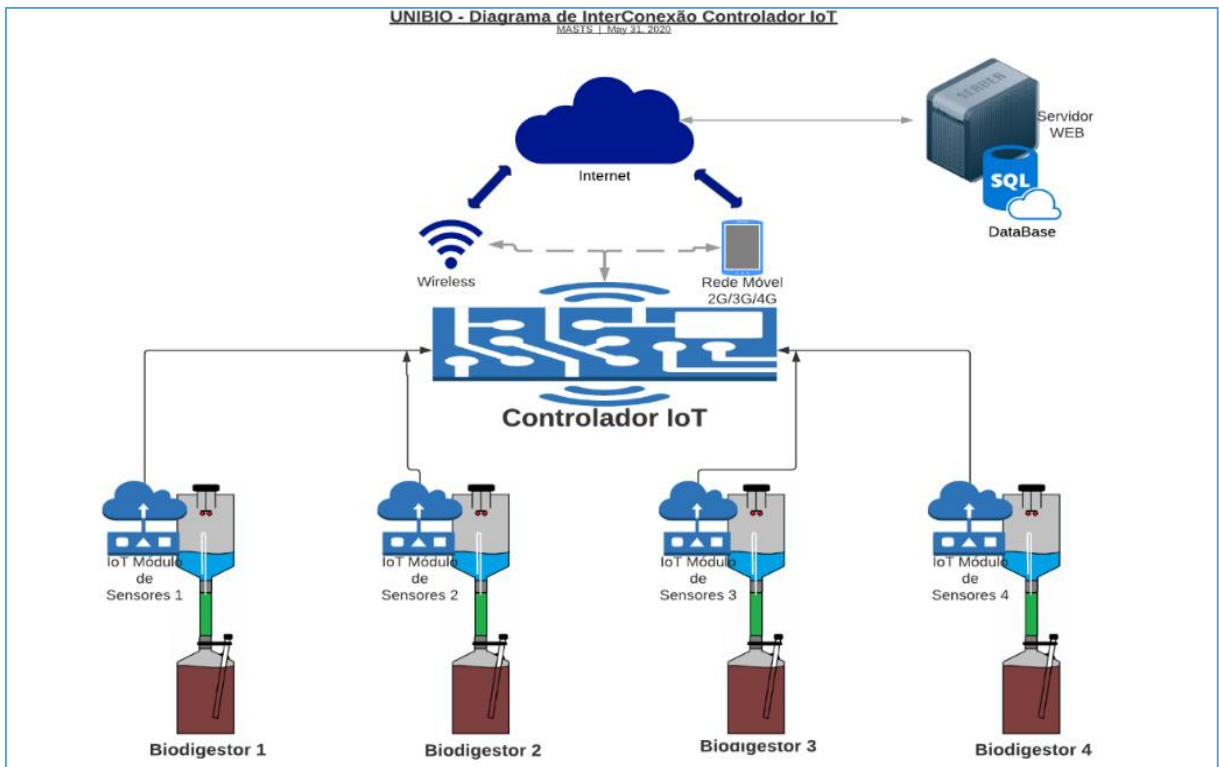
3.3.1 Modelagem do Controlador IoT

Na terceira etapa foi projetado, modelado e desenvolvido o módulo controlador IoT. Equipamento este responsável por controlar fisicamente o monitoramento dos biodigestores no seu ambiente de trabalho. Esse módulo controlador possui as seguintes funções:

- Controlar os módulos de sensores dos biodigestores;
- Realizar captura dos valores de leitura de todos os sensores;
- Normalizar e padronizar os valores capturados e enviar para um banco de dados on-line localizado em uma nuvem de Internet;
- Gerenciar o acesso do controlador com uma rede de dados disponível para acesso à Internet, com o acesso do tipo Rede Wireless – WiFi ou por meio de Rede de Acesso móvel do Tipo 2G/3G/4G;
- Funcionar ininterruptamente 24 horas por dia, 7 dias por semana, coletando e transmitindo dados dos sensores em intervalos programáveis que possam variar entre horas, minutos ou segundos;
- Possuir capacidade de Armazenamento dos dados coletados por um período superior a um mês (para referência de tempo de intervalo de coleta a cada 5 minutos);
- Possuir sistema de controle de falhas para segurança dos dados em casos como:
 - Falhas na rede de acesso à Internet;
 - Falhas no acesso ao Servidor WEB;
 - Falhas no acesso ao Banco de Dados;
 - Permitindo assim o armazenamento dos dados localmente até o restabelecimento da falha de comunicação, garantindo que a leitura dos dados dos sensores ocorra de forma linear e ininterrupta.

Na **Figura 37** é apresentado o diagrama de conectividade do controlador IoT com os demais módulos do sistema UNIBIO para melhor entendimento de funcionamento no sistema.

Figura 37 – Diagrama de conectividade do controlador IoT

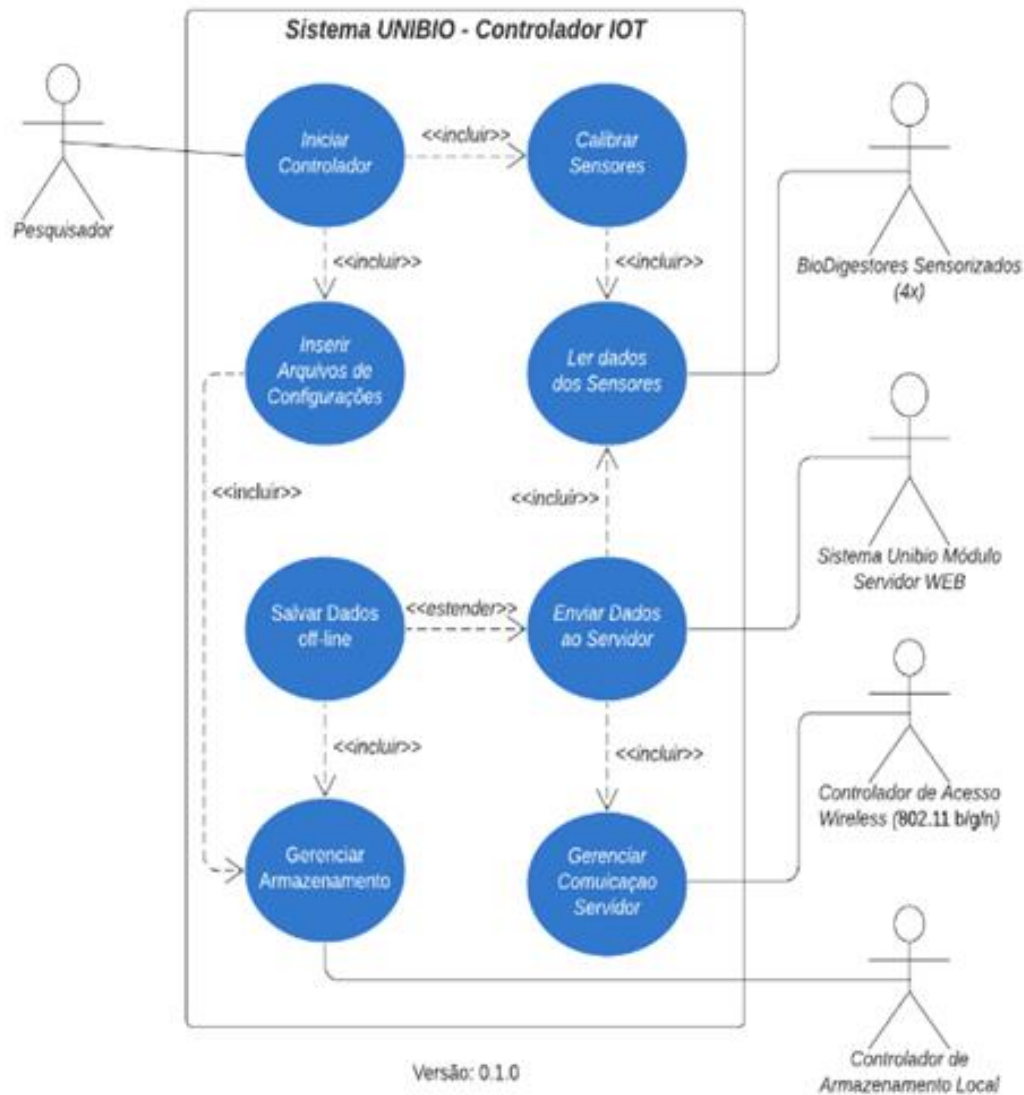


Fonte: Autor (2021)

Para delimitar o escopo e as funcionalidades deste módulo controlador eletrônico foi modelado o diagrama de caso de uso do controlador IoT. Este demonstra todas as interações que o controlador realizará com agentes internos e externos a ele. A **Figura 38** apresenta o diagrama de caso de uso.

Figura 38 – Diagrama de caso de uso do controlador IoT**Diagrama de Caso de Uso - Módulo 1 - Controlador IOT**

MASTS - SISTEMA UNIBIO | July 23, 2020



Fonte: Autor (2021)

3.3.1.1 Modelagem do Hardware

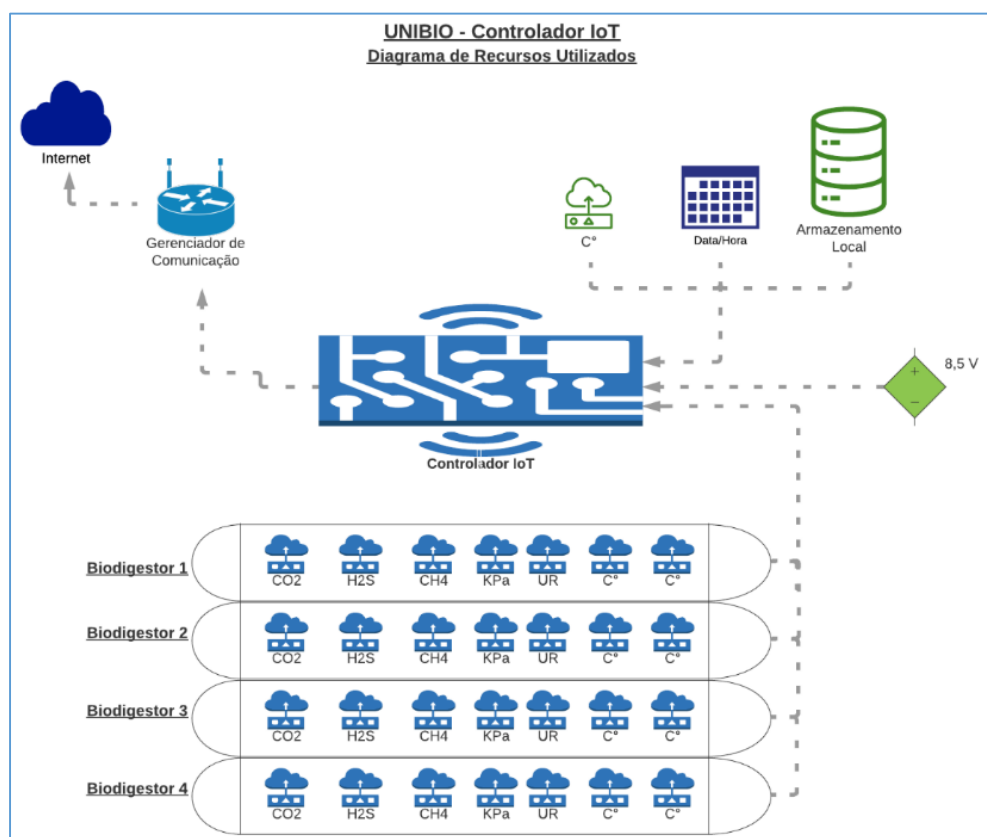
O hardware do controlador IoT UNIBIO é baseado em um microcontrolador do tipo ATMEGA2560 de 8 bits prototipado eletronicamente em uma plataforma compatível com Arduino, presente em sua versão MEGA_2560_Rev_3e.

Optou-se por utilizar um microcontrolador compatível com a plataforma Arduino devido às inúmeras vantagens que a plataforma oferece, entre elas: Aquisição

de Fácil acesso no mercado nacional, plataforma de baixo custo e alta eficiência, ser um projeto open-source, podendo ser utilizado em uso de prototipagem ou uso profissional (MCROBERTS, 2018). Além de que sua configuração se adequa perfeitamente a necessidade do projeto em questão.

Baseado no Diagrama de Casos de uso do controlador IoT elaborou-se o diagrama de recursos necessários ao controlador IoT, conforme apresentado na **Figura 39**.

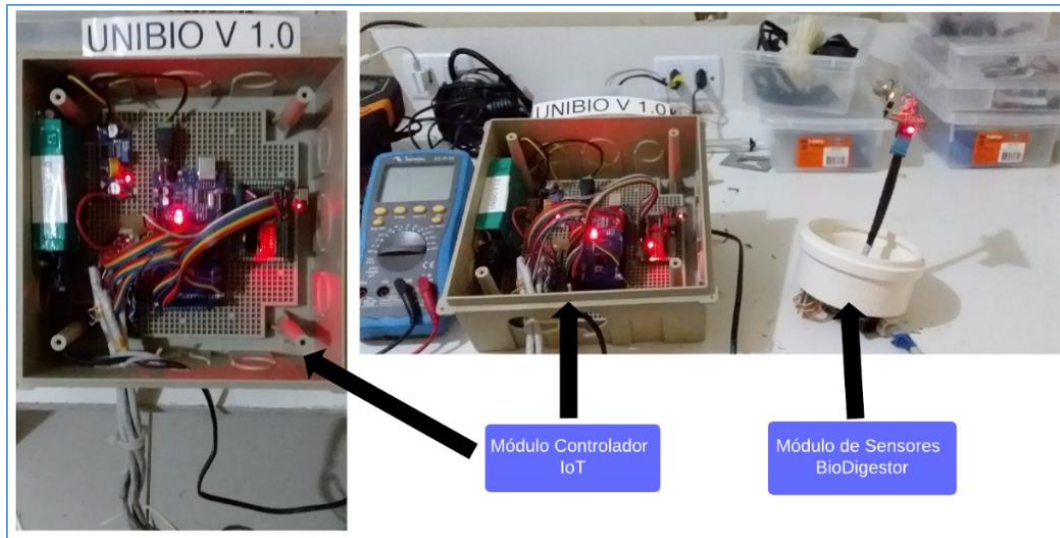
Figura 39 – Diagrama de recursos necessários do controlador IoT



Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 40** é apresentado a fotografia do módulo controlador IoT já construído.

Figura 40 – Módulo do controlador IoT já construído



Fonte: Autor (2021)

Nesta etapa de construção do módulo controlador IoT, foram realizados os passos de: planejamento, pesquisa e criação de elementos em dois segmentos. Tais segmentos são advindos da criação do Hardware do microcontrolador eletrônico e da criação e desenvolvimento do Software, o qual irá funcionar no controlador IoT na forma de software embarcado. Assim, o programa realizará as funcionalidades elencadas na definição deste módulo de controle IoT e será minuciosamente detalhado no capítulo de Materiais e métodos aplicados.

3.3.1.2 Modelagem do Software Embarcado

O software do microcontrolador IoT é desenvolvido em C++, que se trata de uma linguagem orientada a objetos. A partir disso, é possível fazer uma modelagem mais eficaz do software a ser desenvolvido.

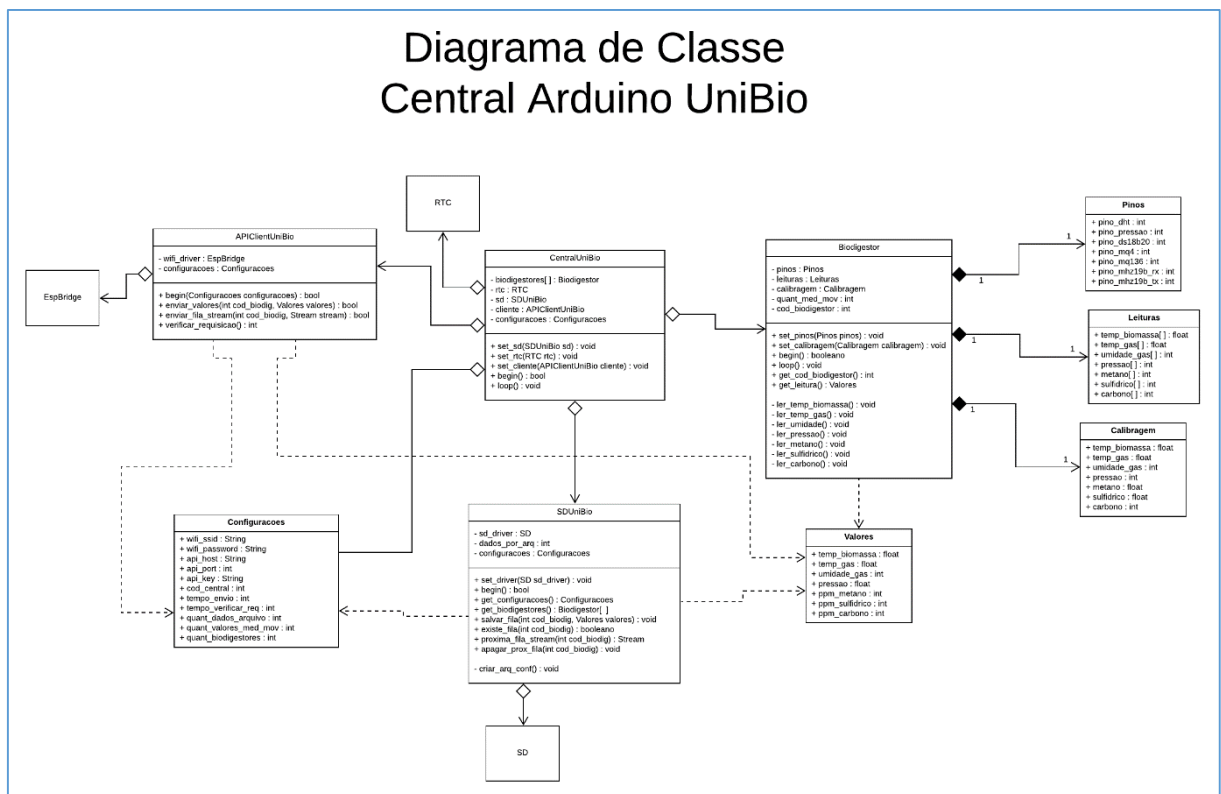
Para a modelagem foram utilizados 2 tipos de diagramas, sendo eles: o diagrama de classes e o diagrama de processos. No que se refere ao diagrama de classes, é possível que o desenvolvedor tenha acesso a como o código ficará organizado. Já no diagrama de processos tem-se uma visão de como os objetos e os módulos do microcontrolador interagirão entre si.

O software do microcontrolador IoT foi organizado em 4 módulos principais e estes separados em classes diferentes, entre eles:

- Controlador ou a Central: que é responsável por manusear os outros 3 módulos;
- Módulo Gerenciador de Armazenamento: responsável por guardar e recuperar as informações do dispositivo de armazenamento;
- Módulo de Internet: responsável por se comunicar com o servidor e com a Internet;
- Biodigestores: responsáveis por se comunicarem com os sensores, fazerem um pré-processamento e retornarem os valores das leituras desses sensores. Esse módulo é responsável por monitorar os biodigestores físicos.

Na **Figura 41** é apresentado o diagrama de classes, que especifica as funções de cada módulo, e que informações eles compartilham.

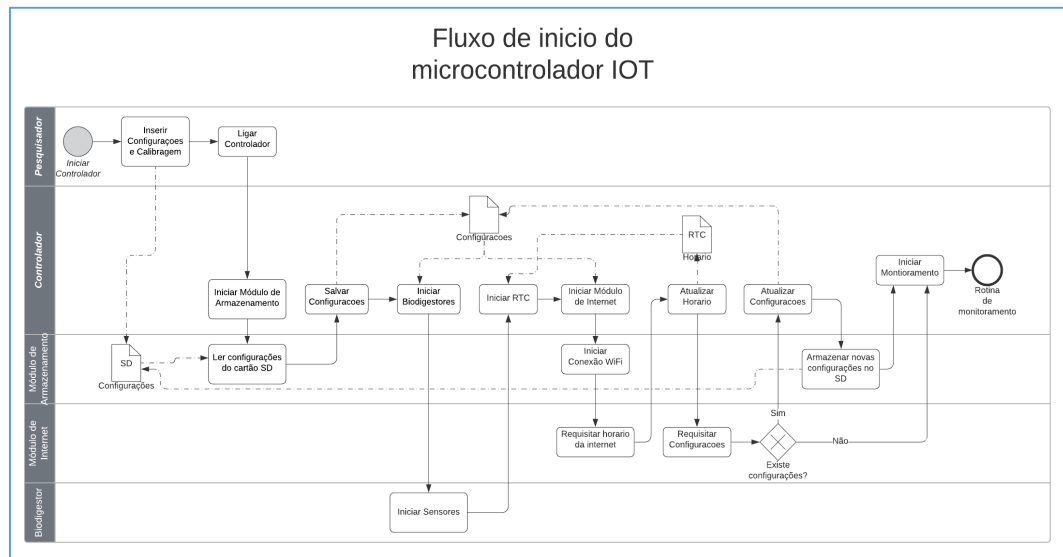
Figura 41 – Diagrama de Classes do Microcontrolador



Fonte: Autor

Na **Figura 42** é apresentado o diagrama de processo do que ocorre quando o microcontrolador é iniciado. Nesse dinamismo todos os módulos e sensores são iniciados e configurados, antes de ser iniciado o monitoramento.

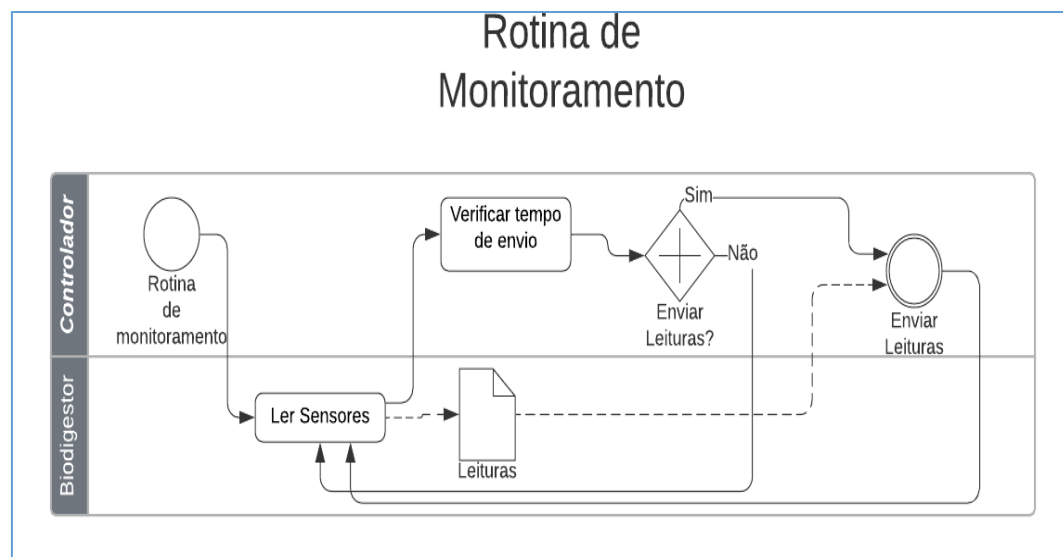
Figura 42 – 1º Diagrama de Processos do Microcontrolador



Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 43** é apresentado o diagrama do processo de monitoramento, ao passar determinado tempo, que é definido nas configurações, só então as leituras dos sensores são enviadas ao servidor.

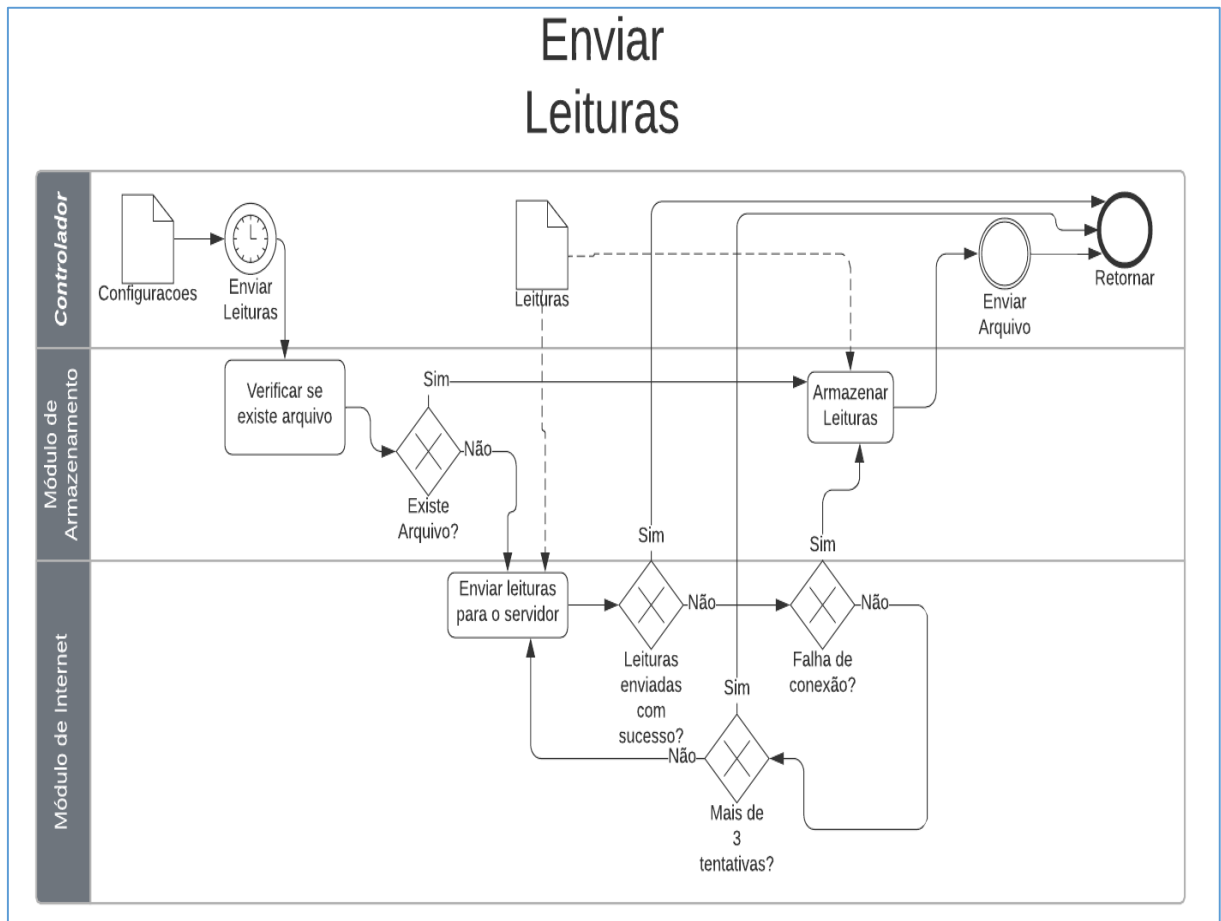
Figura 43 – 2º Diagrama de Processos do Microcontrolador



Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 44** é apresentado o processo de envio de leituras. Caso exista um arquivo de leituras salvas off-line, as últimas leituras serão salvas no arquivo. Após isso, ele é enviado.

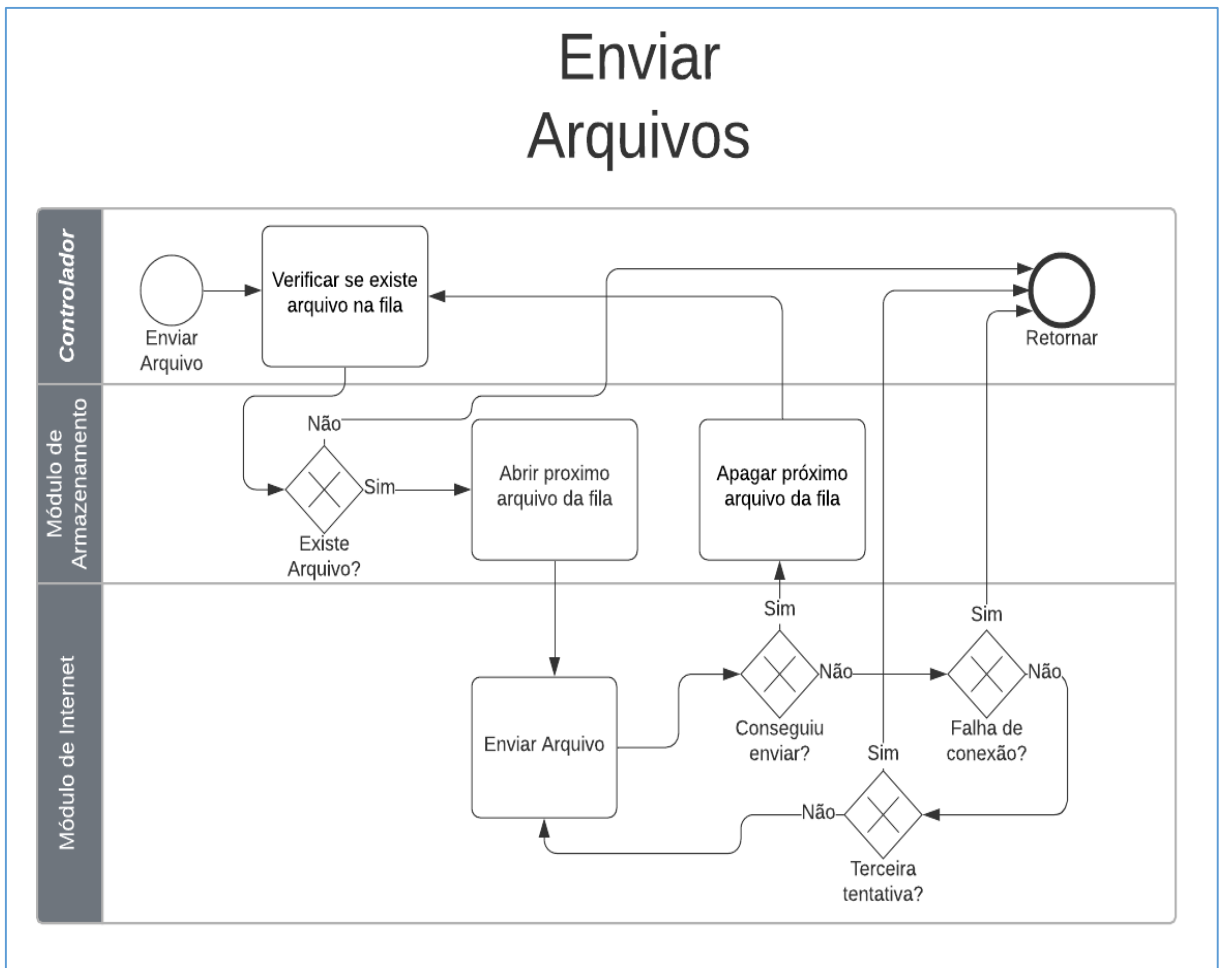
Figura 44 – 3º Diagrama de Processos do Microcontrolador



Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 45** é apresentado o processo de envio de arquivos. Eles são divididos em várias partes, então caso obtenha sucesso no envio de um arquivo, o outro é enviado logo depois. Em conclusão, as leituras mais recentes são salvas no último arquivo.

Figura 45 – 4º Diagrama de Processos do microcontrolador



Fonte: Autor 2021)

3.3.2 Construção do Controlador IoT

O controlador IoT UNIBIO é o módulo eletrônico do projeto que tem a funcionalidade de gerenciar os Módulos de sensores IoT que estão fisicamente acoplados aos biodigestores, assim como tem a função de processar os sinais emitidos pelos sensores que estão inseridos no biodigestor esses sinais são modulados e normalizados para que possam ser enviados ao servidor de Banco de Dados que está localizado na Internet. Outra função importante do Controlador IoT é gerenciar a comunicação de rede de acesso à intranet ou internet para viabilizar o envio dos dados coletados nos sensores para os servidores do sistema UNIBIO.

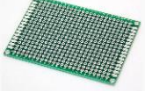
Nesta etapa do projeto foram desenvolvidos paralelamente 3 componentes do projeto no qual o primeiro é a placa eletrônica do controlador (HARDWARE) e o segundo elemento é o programa software de controle desta placa controladora (FIRMWARE) que se apresenta de forma embarcada na placa controladora. No qual

iremos detalhar nos subitens 4.3.2.1 e 4.3.2.2 a seguir, HARDWARE (Placa Controladora IoT Eletrônica) e SOFTWARE (FIRMWARE do Controlador IoT), respectivamente.

3.3.2.1 Construção do Hardware Controlador IoT

Para construção do Hardware do módulo controlador IoT foram utilizados os componentes apresentados no **Quadro 9**.

Quadro 9 - Materiais utilizados na construção do módulo controlador IoT UNIBIO

Item	Descrição	Qtd.	Métrica	Valor do Item (R\$)	Valor Total do Item (R\$)	Imagem
1	Placa Microcontrolador Compatível Arduino Mega 2560 R3	1	Unidade	120,00	120,00	
2	Módulo Microcontrolador WiFi ESP8266 ESP-01	1	Unidade	35,00	35,00	
3	Módulo Regulador de Tensão Step Down XL4015 5ª	1	Unidade	28,00	28,00	
4	Módulo leitor de cartão micro SD	1	Unidade	18,00	18,00	
5	Real Time Clock RTC DS3231	1	Unidade	30,00	30,00	
6	Fonte Alimentação Entrada 110-220VCA Saída 8,5VDC – 5,6ª	1	Unidade	60,00	60,00	
7	Placa de circuito impresso 5x7cm	1	Unidade	8,00	8,00	
8	Adaptador DIP ESP8266 01	1	Unidade	20,00	20,00	
9	Cabo par trançado categoria 6 – 8 vias	12	Metros	4,00	48,00	
10	Conector RJ45- categoria 6	4	Unidade	2,00	8,00	

Item	Descrição	Qtd.	Métrica	Valor do Item (R\$)	Valor Total do Item (R\$)	Imagem
11	Cabo flexível 1,5mm ²	12	Metros	1,50	18,00	
12	Jumper 24 AWG 15 centímetros	52	Unidade	0,40	20,80	
13	Quadro Elétrico Plástico 20cm x 20 cm	1	Unidade	35,00	35,00	
14	Conector box reto 1" com bucha e arruela	1	Unidade	6,00	6,00	
15	Conector box reto 1" com bucha e arruela	4	Unidade	3,50	3,50	
16	Resistor CR12 1/8W 1 kOhm	2	Unidade	0,50	1,00	
17	Resistor CR12 1/8W 2,2 kOhm	1	Unidade	0,50	0,50	
Custo total para 1 módulo controlador IoT UNIBIO:					R\$ 495,80	

Fonte: Autor (2021)

A parte estrutural do controlador IoT é formada pelos itens: 9 (Cabo par trançado categoria 6 – 8 vias), 10 (Conector RJ45 – categoria 6) 11 (Cabo flexível 1,5 mm²), 12 (Jumper 24 AWG 15 cm), 13 (Quadro Elétrico Plástico 20 cm x 20 cm), 14 (Conector box reto 1" com bucha e arruela)

Nesta estrutura o canal de comunicação entre o módulo controlador IoT e o Módulo do Sensores é formada 4 linhas de 9 vias cada linha de cabo par metálico com extensão de 3 metros lineares. Cada linha se destina a interligar um biodigestor sensorizado ao controlador IoT, no qual por essa linha se transmite os sinais analógicos e digitais dos sensores assim como a alimentação dos mesmos em uma tensão de 5 V de corrente contínua estabilizada. A ligação é realizada conforme apresentado no **Quadro 10**.

Quadro 10 – Ligação dos sensores ao módulo controlador IoT

Cabo	Número	Cor do Fio	Conexão
Item 9	Fio 1	Branco/verde	Alimentação positiva
Item 9	Fio 2	Verde	Alimentação negativa
Item 9	Fio 3	Branco/laranja	Sinal gás metano
Item 9	Fio 4	Azul	Sinal gás carbônico
Item 9	Fio 5	Branco-azul	Sinal sulfeto de hidrogênio
Item 9	Fio 6	Laranja	Sinal temperatura gasômetro
Item 9	Fio 7	Branco-marrom	Sinal umidade gasômetro
Item 9	Fio 8	Marrom	Sinal pressão gasômetro
Item 11	Fio 9	Amarelo	Sinal temperatura biomassa

Fonte: Autor (2021)

Para esta linha que terá o alcance de 3 metros entre o controlador IoT e os biodigestores foram utilizados os itens: 9 e 11. No qual para o item 9 – cabo par trançado na extremidade do biodigestor foi utilizado o conector o RJ45(ITEM 10) crimpado no padrão EIA/TIA-568^a. Já para o item 11 – cabo flexível na extremidade do biodigestor fio utilizado conector SM02 (ITEM 15). Para a extremidade da linha de comunicação que fica no controlador IoT foram utilizados para todos os cabos e fios jumper (item 12) x 36 unidades que serão conectados em seus respectivos pinos eletrônicos no projeto.

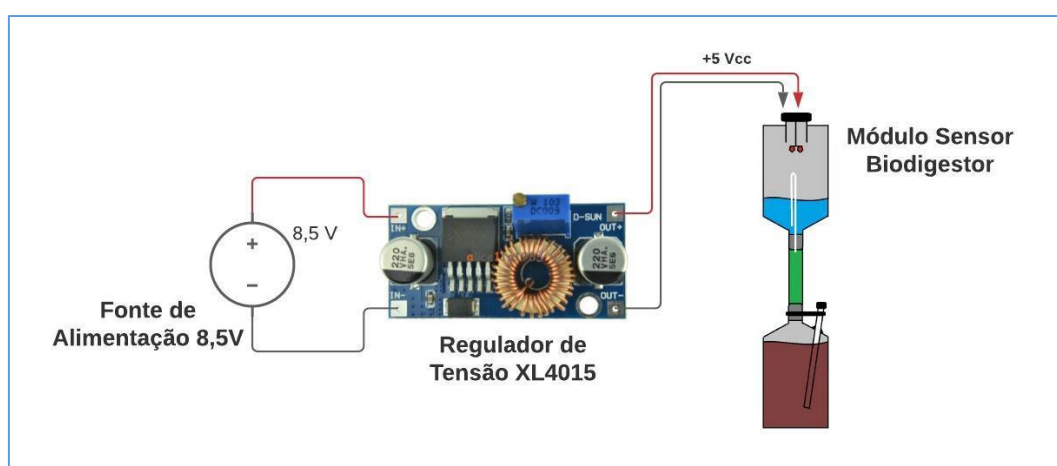
Os componentes e módulos eletrônicos do projeto estarão acondicionados na caixa plástica (item 13), que terá o acoplamento do box reto 1 polegada (item 14) para passagem de forma segura dos cabos que farão ligação com os sensores dos biodigestores

A parte de alimentação do controlador IoT será formada pelo item 6 (Fonte Alimentação Entrada 110-220 VCA Saída 8,5 VDC – 5,6^a) e pelo item 3 (Módulo Regulador de Tensão step down XL4015 5^a). No qual a fonte de alimentação com

saída de 8,5 V e corrente suportada de até 5.6 A será a fonte de energia principal do projeto e alimentará diretamente (8,5 V) o microcontrolador Arduino Mega (item 1) e o regulador de tensão (item 3).

O regulador de tensão step down (item 3) será responsável por fornecer alimentação regulada e estabilizada de 5 V exclusivamente para os módulos sensores dos biodigestores. No qual receberá uma tensão de 8,5 V em sua entrada provinda da fonte (item 6) e fornecerá em sua saída uma tensão regulada de 5 V corrente direta. A **Figura 46** apresenta o diagrama de interligação do regulador de tensão XL4015 no projeto UNIBIO.

Figura 46 – Diagrama de interligação do Regulador de Tensão



Fonte: Autor (2021)

Na seção eletrônica do controlador IoT foram utilizados os componentes listados abaixo:

- Item 1 – Placa Microcontrolador Compatível Arduino Mega 2560 R3
- Item 2 – Módulo Microcontrolador WiFi ESP8266 ESP-01
- Item 3 – Módulo Regulador de Tensão step down XL4015 5^a
- Item 4 – Módulo leitor de cartão micro SD
- Item 5 – Real Time Clock RTC DS3231
- Item 6 – Fonte Alimentação Entrada 110-220 VCA, Saída 8,5 VDC – 5,6^a
- Item 7 – Placa de circuito impresso 5x7cm
- Item 8 – Adaptador DIP ESP8266 01

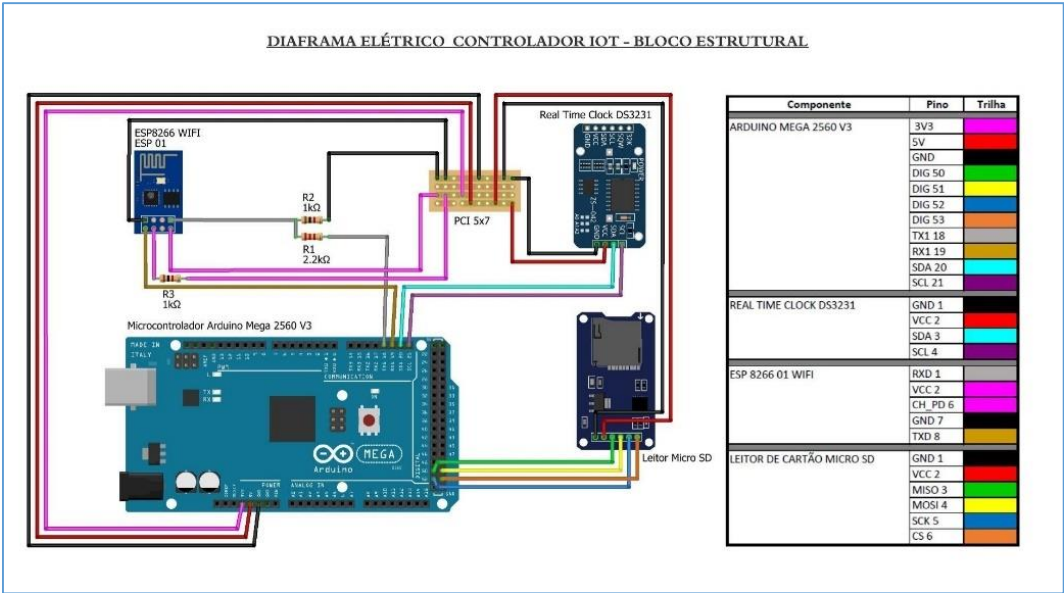
- Item 12 – Jumper 24 AWG 15 centímetros
- Item 16 – Resistor CR12 1/8 W 1 kOhm
- Item 17 – Resistor CR12 1/8 W 2,2 kOhm

A placa de circuito impresso (item 7) foi utilizada para concentrar os componentes acessórios ao Microcontrolador Arduino Mega, esses módulos foram soldados à placa PCI e são eles: item 2 (ESP8266), item 4 (Leitor SD), Item 5 (RTC DS3231) e item 8 (Adaptador ESP8266). Após a montagem, a placa PCI foi interligada ao Microcontrolador Arduino Mega através de jumpers de conectividade (item 12).

O Adaptador DIP ESP8266 01(item 8) é um acoplador que neste projeto tem a função de tornar o módulo ESP8266 removível da placa PCI (item 7), pois o ESP8266 trata-se de um microcontrolador específico e caso precise ser reprogramado ele precisa ser conectado a um módulo serial de gravação para ESP, e em caso de manutenção, esse acoplador torna o encaixe e desencaixe do módulo de forma prática evitando a necessidade de ressoldagem do componente.

A interligação física entre os componentes eletrônicos do controlador IoT ocorreu conforme apresentado na **Figura 47**.

Figura 47 – Interligação entre os componentes eletrônicos do controlador IoT

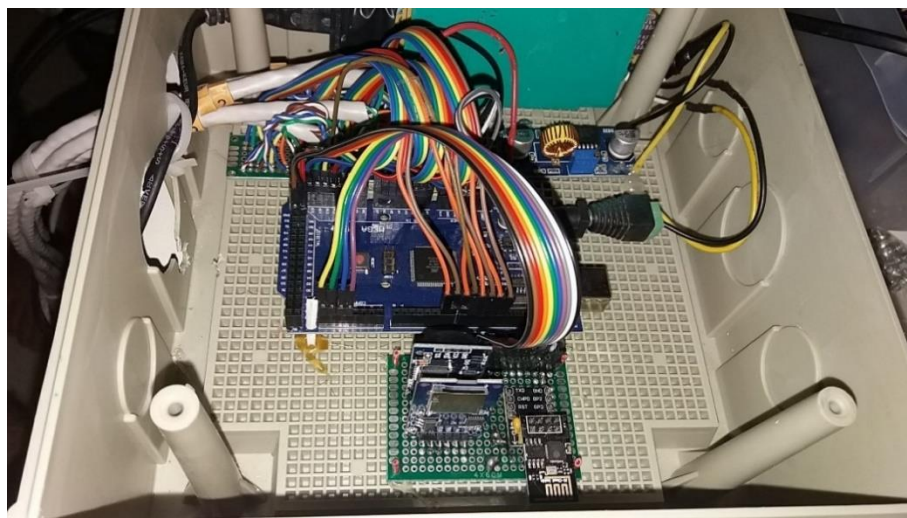


Fonte: Autor (2021)

Os itens 16 (resistor de 1 kOhm) e 17 (resistor 2,2 kOhm) foram utilizados na interligação entre os itens 1 (Microcontrolador Arduino Mega) e 2 (Microcontrolador ESP8266) para realizar o alinhamento das tensões de trabalhos dos dois componentes que é de 5 V nas portas digitais do Arduino Mega e de 3,3 V nas portas digitais do ESP8266. A ligação desses itens é realizada conforme o diagrama acima.

A **Figura 48** apresenta como ficou o bloco estrutural do módulo controlador IoT montado.

Figura 48 – Bloco Estrutural do Módulo Controlador IoT



Fonte: Autor (2021)

3.3.2.2 Construção do Software Embarcado

O desenvolvimento do software embarcado foi feito no Arduino IDE, onde foi programado tanto o ESP8266 como também o Arduino Mega.

Os dois microcontroladores possuem um tempo de execução próprio, então é necessário que haja uma comunicação bem definida e cronometrada para que não haja perda de informações. Foi definido uma comunicação mestre-escravo entre os dois dispositivos, em uma relação mestre-escravo o dispositivo mestre controla e acessa o dispositivo escravo através de uma interface de comunicação própria (STOLOJESCU-CRISAN, CRISAN e BUTUNOI, 2021). O ESP8266 assume o papel de dispositivo escravo, pois servirá para fornecer conectividade à internet para o Arduino, que é o dispositivo mestre e que foi definido como o fluxo de execução principal.

3.3.2.2.1 ESP8266

Para a comunicação entre o ESP8266 e o Arduino Mega, foi utilizado a interface serial UART. A programação do software embarcado no microcontrolador ESP8266 foi desenvolvida em um modelo onde recebe comandos e retorna algum resultado com base nesse comando.

Primeiramente o ESP8266 recebe uma mensagem que identifica qual o comando a ser executado, e com base nesse comando são recebidos os dados úteis para a determinada requisição. Após receber o comando e os dados úteis, são executadas as tarefas e os processamentos relativos ao comando, então é retornado uma resposta de sucesso ou falha, adicionado de outros dados, se necessário.

Os comandos que podem ser recebidos são os seguintes listados:

- Teste – Usado para testar se o ESP8266 está funcionando e pronto para receber requisições;
- Firmware – Retorna qual a versão de firmware do ESP8266;
- Estado do WiFi – Retorna qual é o estado do WiFi, se está conectado ou não;
- Conectar WiFi – Conecta a um determinado WiFi, sendo especificado o SSID e a senha da rede desejada;
- Enviar requisição HTTP – Usado para enviar uma requisição HTTP, sendo especificado qual o método HTTP desejado, a URL, os cabeçalhos e o corpo da mensagem se necessário.

No **Quadro 11** são apresentadas as mensagens são que enviadas do Arduino para o ESP8266.

Quadro 11 – Mensagens Possíveis do ESP8266

Comando	Mensagem a ser enviada	Mensagem a ser recebida
Teste	"teste\x04"	"ok\x04"
Firmware	"firmware\x04"	" {versão} \x04"
Estado do WiFi	"wifi_status\x04"	" {estado} \x04"
Conectar WiFi	"wifi_connect\x04 {SSID} \x04 {Senha} \x04"	"error\x04" ou "ok\x04"
Enviar requisição HTTP	"http_send\x04 {URL} \x04 {Método} \x04 {Cabeçalho 1} \x03 {Cabeçalho 2} \x03 {Cabeçalho N} \x04 {Corpo} \x04"	"error\x04" ou "ok\x04 {Código HTTP} \x04 {Corpo} \x04"

Fonte: Autor (2021)

3.3.2.2.2 Arduino Mega

O Arduino Mega foi utilizado como o microcontrolador principal, é através dele que as leituras são realizadas, padronizadas e enviadas para o servidor, ou armazenadas caso não se consiga enviar para o servidor.

Como C++ é uma linguagem orientada a objetos, o código foi dividido em diferentes classes de acordo os diferentes módulos especificados na etapa de modelagem. As classes e métodos criados são especificados a seguir:

- Classe Biodigestor: Essa classe visa representar um módulo sensor que está conectado a um biodigestor, um projeto pode ter várias instâncias dessa mesma classe. Nessa classe é onde são realizadas as leituras dos sensores e é feito também alguns pré-processamentos nos valores dos sensores. A seguir são explicados os métodos mais importantes dessa classe.
 - void loop(): Nesse método são feitas as leituras dos sensores que necessitam realizar a média móvel para se ter um sinal mais constante e estável, esse método deve ser executado sempre que possível;
 - void begin() : Esse método deve ser executado logo após que a classe é instanciada e configurada com o método *set_config*, é nesse método que todos os sensores são iniciados e configurados devidamente;
 - bool set_config(chave, valor): Esse método é utilizado para definir com o parâmetro *valor* a configuração identificada pelo parâmetro *chave*. As seguintes configurações podem ser definidas:
 - pin_dht : valor inteiro definindo qual é o pino referente ao sensor DHT11;
 - pin_mhz_rx : valor inteiro definindo qual é o pino referente ao pino rx do sensor MH-Z19B;
 - pin_mhz_tx : valor inteiro definindo qual é o pino referente ao pino tx do sensor MH-Z19B;
 - pint_ds18 : valor inteiro definindo qual é o pino referente ao sensor DS18B20;
 - pin_pressao : valor inteiro definindo qual é o pino referente ao sensor de Pressão;
 - pin_mq4 : valor inteiro definindo qual é o pino referente ao sensor MQ-4;

- pin_mq136 : valor inteiro definindo qual é o pino referente ao sensor MQ-136;
- calib_temp_biomassa : valor real que será utilizado na calibração da leitura da temperatura de biomassa;
- calib_temp_gas : valor real que será utilizado na calibração da leitura da temperatura dentro da câmara de gás;
- calib_umidade: valor inteiro que será utilizado na calibração da leitura da umidade;
- calib_pressao: valor real que será utilizado na calibração da leitura de pressão;
- calib_metano: valor real que será utilizado na calibração da leitura de gás metano dentro da câmara de gás;
- calib_sulfidrico: valor real que será utilizado na calibração da leitura de gás sulfídrico dentro da câmara de gás;
- calib_carbono: valor real que será utilizado na calibração da leitura de gás carbônico dentro da câmara de gás;
- Leitura get_leitura() : retorna um objeto do tipo Leitura que contém os valores de leituras mais recentes dos sensores do biodigestor. A classe Leitura será especificada mais à frente;
- Classe Leitura: Classe que serve apenas para conter os dados das leituras dos sensores de um determinado biodigestor. Não há nenhum método para essa classe, apenas acesso aos atributos.
- Classe SD_Unibio: Classe que é responsável por gerir o armazenamento do microcontrolador. Essa classe irá armazenar e recuperar leituras e dados de configurações da mídia de armazenamento SD. A seguir têm-se os métodos dessa classe.
 - void begin(sd_driver) : Método que irá ser executado assim que o microcontrolador for iniciado. Irá receber o endereço em memória do objeto que está relacionado ao módulo SD e então fará as devidas configurações;
 - bool ler_conf_geral() : Método responsável por ler as configurações que estão salvas na mídia de armazenamento. As configurações lidas serão salvas no atributo configurações que é um objeto da classe Configurações, que será especificada mais à frente. Retorna verdadeiro

se obteve sucesso na leitura das configurações;

- `bool salvar_conf_geral(conteúdo)` : Método responsável por salvar as configurações recebidas no parâmetro *conteúdo* na mídia de armazenamento. Retorna verdadeiro se o salvamento obteve sucesso;
- Configurações `get_conf()`: Retorna as configurações que foram lidas anteriormente;
- `bool salvar_conf_biodigestor(cod_biodigestor, conteúdo)` : Método responsável por salvar as configurações contidas no parâmetro *conteúdo* para um determinado biodigestor de código contido no parâmetro *cod_biodigestor*. Retorna verdadeiro se obteve sucesso no salvamento;
- `bool ler_biodigestores()` : Método responsável por instanciar os biodigestores conforme as configurações armazenadas na mídia de armazenamento. Retorna verdadeiro se obteve sucesso na leitura dos arquivos;
- `bool get_biodigestores()` : Retorna os biodigestores que foram instanciados no método *ler_biodigestores*;
- `bool existe_fila(cod_biodigestor)` : Verifica se existe arquivos de leituras a serem enviados para o biodigestor de código definido no parâmetro *cod_biodigestor*. Retorna verdadeiro se existir arquivo.
- `File get_fila_fileStream(cod_biodigestor)`: Retornar o próximo arquivo de leituras da fila para o biodigestor de código definido pelo parâmetro *cod_biodigestor*;
- `bool salvar_fila(cod_biodigestor, leitura)`: Salva a leitura definida no parâmetro *leitura* no último arquivo da fila de arquivos. Retorna verdadeiro se obteve sucesso;
- `bool apagar_prox_fila(cod_biodigestor)`: Apaga o próximo arquivo da fila de arquivos do biodigestor de código definido no parâmetro *cod_biodigestor*. Retorna verdadeiro se obteve sucesso;
- Classe Configurações: Classe utilizada somente para armazenar os dados de configurações do microcontrolador. A classe não possui métodos.
- Classe EspBridge: Classe responsável por fazer comunicação com o ESP8266. É utilizada pela classe *ApiClientUnibio*. A seguir têm-se os métodos dessa classe.

- `bool begin()` : Inicia o ESP8266 e retorna verdadeiro se foi possível se comunicar com ele.
- `bool wifi_begin (ssid,password)` : Conecta o wifi com os parâmetros ssid e password;
- `bool http_get(url,porta,uri,headers)` : Faz uma requisição GET de acordo com a URL e os cabeçalhos especificados nos parâmetros;
- `bool http_post(url,porta,uri,headers,payload)` : Faz uma requisição POST de acordo com a URL, cabeçalhos e dados, especificados nos parâmetros;
- `bool ler_resposta()`: Recebe a resposta de uma requisição e salva em uma variável. Retorna verdadeiro se possível ler a resposta;
- `String get_resposta()`: Retorna a resposta de uma requisição salva em uma variável no Arduino. Deve ser executado após o método *ler_resposta*;
- `Void apagar_resposta()`: Limpa a variável da resposta de uma requisição. Utilizada para liberar memória.
- `Int get_codigo()`: Retorna o código HTTP de uma requisição realizada;
- Classe `ApiClientUnibio`: Classe que é responsável por fazer a comunicação com o servidor do sistema UNIBIO. Utiliza a classe *EspBridge* que foi definida anteriormente. A classe possui os seguintes métodos:
 - `Bool begin(configurações)`: Inicia a classe *EspBridge* e faz as configurações necessárias. Retorna verdadeiro se foi possível realizar as configurações necessárias e se o dispositivo WiFi está corretamente conectado;
 - `Bool ler_conf_central()`: Lê as configurações que estão salvas no servidor do sistema UNIBIO. Retorna verdadeiro se foi possível ler as configurações do servidor;
 - `Bool ler_conf_biodigestor(cod_biodigestor)`: Lê as configurações de um determinado biodigestor, de acordo com seu código, do servidor do sistema UNIBIO. Retorna verdadeiro se foi possível ler as configurações do servidor.
 - `Bool verificar_reinicio()`: Verifica no servidor se o usuário do sistema solicitou que o microcontrolador seja reiniciado. Retorna verdadeiro se o sistema deve ser reiniciado;

- Bool verificar_requisicao(cod_biodigestor): Verifica no servidor se o usuário solicitou alguma leitura instantânea para o biodigestor identificado pelo seu código. Retorna verdadeiro se o usuário solicitou a leitura instantânea;
- Bool data_hora(): Requisita ao servidor a data e hora atual em UTC+0. Retorna verdadeiro se foi possível receber a hora;
- Int enviar_leitura(cod_biodigestor, leitura): Envia uma leitura do biodigestor identificado pelo seu código. Pode retornar os seguintes valores:
 - 2 – Horário da leitura inválido
 - 1 – Leitura armazenada no banco com sucesso
 - 0 – Falha ao enviar leitura
- Int enviar_fila(cod_biodigestor, arquivo): Envia as leituras armazenadas no dispositivo de armazenamento do biodigestor identificado pelo código. Pode retornar os seguintes valores:
 - 2 – Formatação do arquivo inválida
 - 1 – Leituras armazenadas no banco com sucesso
 - 0 – Falha ao enviar leitura
- String get_resposta(): Retorna a resposta da última requisição realizada;
- Int get_codigo(): Retorna o código HTTP da última requisição;
- Void apagar_resposta(): Limpa da memória a resposta da última requisição realizada;

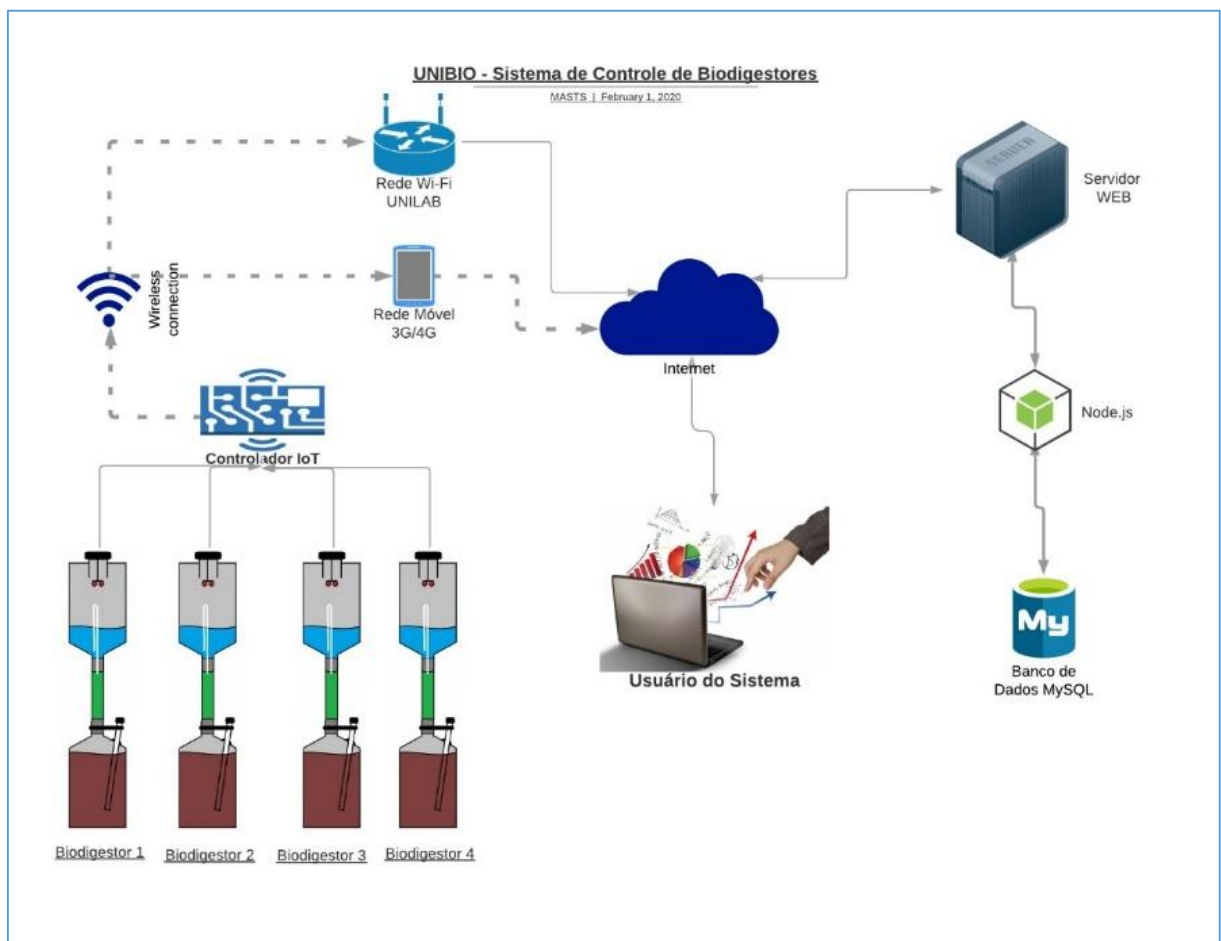
Todas essas classes são controladas pelo Arduino Mega, e o método de execução principal, o método loop, pode ser identificado como a Central que foi definido na modelagem do sistema UNIBIO. Essa Central pode conter um ou mais Biodigestores, irá conter o módulo gerenciador de armazenamento, que é a classe SD_Unibio, e o módulo de acesso à internet, que é a classe ApiClientUnibio.

3.4 Sistema UNIBIO

Nesta etapa, dedicada à área de softwares, programas e sistemas, foi modelado e construído o sistema de acompanhamento e análise dos dados gerados durante o processo de biodigestão assim como foi realizada a definição, configuração e implantação da infraestrutura de computação e comunicação necessária para que o sistema estivesse acessível na Internet e interligado em tempo integral com os biodigestores eletrônicos de forma remota no qual foi realizado o monitoramento dos parâmetros coletados pelos sensores durante todo o processo de biodigestão.

O sistema completo de monitoramento de biodigestores foi denominado de sistema UNIBIO e teve sua estrutura funcional representada conforme o diagrama apresentado na **Figura 49**.

Figura 49 - Diagrama da estrutura funcional do sistema UNIBIO



Fonte: Autor (2021)

A visão macro do desenvolvimento da arquitetura de software do sistema UNIBIO pode ser classificada em duas partes: o servidor API REST e o Aplicativo Web.

O Servidor API REST é o responsável por fornecer uma interface que servirá como base para outras partes do sistema, é nessa interface onde é feita a troca de dados e feito algumas atividades mais complexas, onde as informações são transferidas através de uma representação atual ou desejada do estado de um dado. Por conta desse servidor outras partes do sistema não precisam se preocupar em como trabalhar com alguns dados, precisando apenas se comunicar com essa API e utilizar a resposta fornecida. A arquitetura REST foi escolhida por providenciar uma interface simples e direta para acessar serviços na internet, principalmente em aplicações IOT, além de oferecer um bom desempenho (DE MELO SILVA *et al.*, 2016).

O Aplicativo Web é responsável por fornecer para o usuário final uma forma de interagir com os dados de seus biodigestores monitorados. Por funcionar na internet pode ser acessado de qualquer dispositivo que tenha um navegador em qualquer parte do mundo.

No sistema, o Grafana é utilizado para gerar gráficos e relatórios sobre os dados que estão sendo recebidos pelos biodigestores. Os gráficos gerados podem ser compartilhados e acessados de qualquer parte do mundo, desde que haja conexão com a Internet.

Para um melhor entendimento, a implantação do sistema UNIBIO foi subdividida em quatro tópicos de acordo com a área de conhecimento envolvida:

3.4.1 Infraestrutura Computacional

A seguir é apresentado como foi preparado e configurado o equipamento servidor para armazenar os sistemas web e os sistemas de banco de dados do projeto UNIBIO de forma que fiquem acessíveis de forma segura na internet, além da instalação de ferramentas, aplicativos e serviços necessários para o correto funcionamento do sistema UNIBIO.

3.4.1.2 Sistema Servidor

Para hospedar o sistema UNIBIO foi utilizado um servidor com o Sistema Operacional Ubuntu 20.04, baseado em Linux. Para o correto funcionamento do sistema foram instalados alguns aplicativos de terceiros que estão listados abaixo:

- Node.js
- MySQL
- PM2
- Grafana
- Nginx
- UFW

O Sistema Operacional usado não possuía Interface Gráfica do Usuário, então foi usado o Shell do Linux para realizar a instalação.

Antes de instalar qualquer dos aplicativos deve-se executar o seguinte comando:

```
sudo apt update
```

3.4.1.1 Node.js

Para instalação do Node.js deve-se executar os seguintes comandos:

```
sudo apt install nodejs  
sudo apt install npm
```

O Node.js irá apenas executar o Sistema UNIBIO então nenhuma configuração é necessária.

3.4.1.2 MySQL

Para instalação do MySQL deve-se executar o seguinte comando:

```
sudo apt install mysql-server
```

Para a configuração deve-se executar um script com o seguinte comando, onde será definido a senha e algumas questões de segurança:

```
sudo mysql_secure_installation
```

Para preparar o MySQL para o Sistema UNIBIO é necessário criar um usuário específico e criar os bancos de dados e tabelas do sistema. Para criar o usuário executa-se os seguintes comandos:

```
sudo mysql
CREATE USER 'unibio'@'localhost' identified by 'unibiomysqlsenha';
GRANT ALL PRIVILEGES ON *.* TO 'unibio'@'localhost' WITH GRANT OPTION;
```

E para finalizar deve-se sair da aplicação com o comando:

```
exit
```

Após essas etapas o MySQL está pronto para receber o Sistema UNIBIO.

3.4.1.2 PM2

Para instalar o PM2 usa-se o comando:

```
sudo npm install pm2 -g
```

Para configurar o início automático do PM2 usa-se o comando:

```
pm2 startup systemd
```

Ao executar esse comando irá ser gerado uma resposta, deve-se copiar a última linha dessa resposta e utilizá-la como um novo comando.

Após essas etapas o PM2 está pronto para ser utilizado.

3.4.1.5 Grafana

Para instalar o Grafana deve-se executar os seguintes comandos:

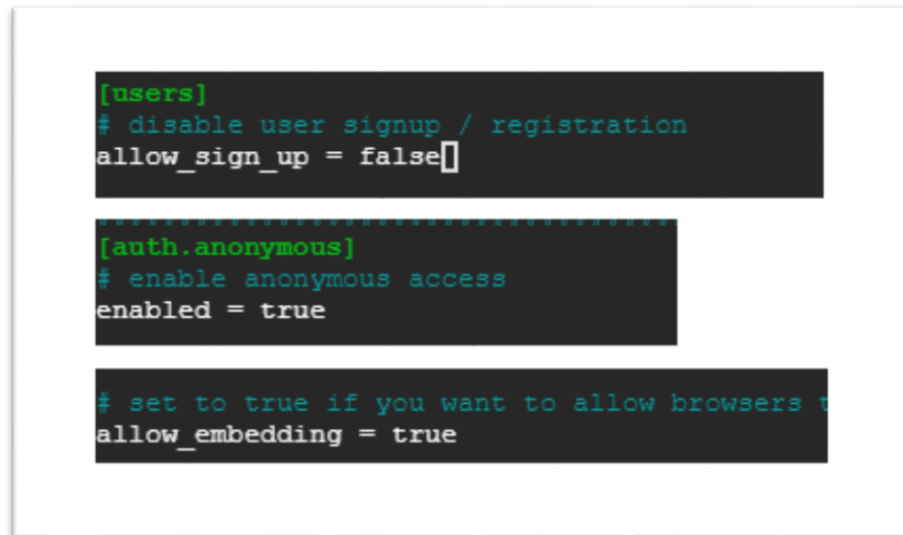
```
wget -q -O - https://packages.grafana.com/gpg.key | sudo apt-key add -
sudo add-apt-repository "deb https://packages.grafana.com/oss/deb stable main"
sudo apt update
sudo apt install grafana-server
sudo grafana-server start
sudo grafana-server enable
```

Após a instalação, deve-se alterar algumas configurações. Deve-se executar o comando:

```
sudo nano /etc/grafana/grafana.ini
```

O comando acima irá abrir um editor, nesse editor deixe as propriedades assim como está apresentado na **Figura 50**. Após alterar aperte 'CTRL+X' e 'Y'.

Figura 50 – Propriedades do Grafana

A screenshot of a text editor showing the configuration file for Grafana. The file contains three sections: [users], [auth.anonymous], and a section for embedding. The [users] section has a comment '# disable user signup / registration' and 'allow_sign_up = false'. The [auth.anonymous] section has a comment '# enable anonymous access' and 'enabled = true'. The embedding section has a comment '# set to true if you want to allow browsers to embed this dashboard' and 'allow_embedding = true'.

```
[users]
# disable user signup / registration
allow_sign_up = false

[auth.anonymous]
# enable anonymous access
enabled = true

# set to true if you want to allow browsers to embed this dashboard
allow_embedding = true
```

Fonte: Autor

Para finalizar execute o comando:

```
sudo service grafana-server restart
```

Agora o Grafana está pronto para ser usado.

3.4.1.6 Nginx

Para instalar o Nginx utiliza-se o comando:

```
sudo apt install nginx
```

Devemos então configurar as rotas do Nginx, para isso execute os comandos:

```
sudo rm /etc/nginx/sites-enabled/default
sudo nano /etc/nginx/sites-available/unibio
```

Então digite o conteúdo abaixo da configuração do Nginx , salve e saia.

```
server {
    listen 80;
    server_name api.unibio.online www.api.unibio.online;

    location / {
        proxy_pass https://localhost:8000;
        proxy_set_header Host $host;
        proxy_set_header X-Real-IP $remote_addr;
        proxy_set_header X-Forwarded-For $proxy_add_x_forwarded_for;
        proxy_set_header X-Forwarded-Proto $scheme;
    }
}

server {
    listen 80;
    server_name graph.unibio.online www.graph.unibio.online;

    location / {
        proxy_pass https://localhost:3000;
        proxy_set_header Host $host;
        proxy_set_header X-Real-IP $remote_addr;
        proxy_set_header X-Forwarded-For $proxy_add_x_forwarded_for;
        proxy_set_header X-Forwarded-Proto $scheme;
    }
}

server {
    listen 80;
    server_name unibio.online www.unibio.online;

    location / {
        proxy_pass https://localhost:5000;
        proxy_set_header Host $host;
        proxy_set_header X-Real-IP $remote_addr;
        proxy_set_header X-Forwarded-For $proxy_add_x_forwarded_for;
        proxy_set_header X-Forwarded-Proto $scheme;
    }
}
```

Para finalizar digite os seguintes comandos:

```
sudo ln -s /etc/nginx/sites-available/unibio /etc/nginx/sites-enabled/unibio
sudo systemctl reload nginx
```

Agora o Nginx já está funcionando como proxy reverso, faltando apenas iniciar os servidores

3.4.1.7 UFW

O UFW não é necessário instalar, pois já vem juntamente com o Ubuntu 20.04, para configurá-lo execute os seguintes comandos:

```
sudo ufw allow 22/tcp
sudo ufw allow 80/tcp
sudo ufw enable
```

Então o Firewall do Ubuntu já está funcionando, liberando apenas para a porta dos protocolos SSH e HTTP.

3.4.1.8 UNIBIO

Após instalados todos os aplicativos, para instalar o UNIBIO no servidor é necessário fazer o download no site do sistema e então extrair o arquivo na pasta do usuário do Ubuntu, então executar os seguintes comandos:

```
cd unibio
cd unibio-api
npm install
pm2 start app.js
cd ..
cd unibio-app
npm install
pm2 start app.js
```

Pronto, o sistema UNIBIO está pronto para ser utilizado.

3.4.2 Sistema Servidor Web

A seguir é definido, modelado e implementado o sistema servidor web que fará a função de processar os dados enviados pelo controlador IoT dos biodigestores eletrônicos e armazená-los em um banco de dados.

Foi definido que toda aplicação final deve se comunicar com o UNIBIO-API quando se trabalha com dados e ações específicas. Isso facilita o processo de desenvolvimento dessas aplicações finais e garante a segurança em dados específicos. A partir do UNIBIO-API pode-se realizar atividades como:

- Validação de usuários;
- Requisição de dados;
- Recebimento de dados de biodigestores monitorados;

- Atualização de configuração de UNIBIO-Devices;
- Pesquisa de biodigestores cadastrados.

Ao criar qualquer sistema computacional é extremamente importante fazer a sua modelagem pois garante que o sistema cumpra todos os requisitos propostos para o projeto além de facilitar o processo de implementação, manutenção e atualização. A modelagem foi feita seguindo os seguintes passos:

- Estudo e análise do problema
- Análise de requisitos
- Design de rotas da API

Para o servidor API foi decidido utilizar uma arquitetura REST, isso implica que é possível interagir com essa API trocando mensagens que seguem o protocolo HTTP, que é muito utilizada na Internet hoje em dia.

O servidor foi desenhado seguindo as rotas do **Quadro 12** onde é definido o tipo de requisição, a rota e a descrição do que é feito nessa determinada rota. A requisição pode ser definida em:

- POST – Inserir dados e executar atividades específicas;
- GET – Requisitar dados;
- PUT – Alterar de dados;
- DELETE – Remover de dados;

A rota se refere a um determinado dado ou atividade que é colocado em uma árvore de hierarquia de dados. Nessa rota a hierarquia é separada pelo caractere '/' e entre esse caractere é definido o dado a ser chamado (atributo). Em determinados casos é necessário um atributo dinâmico, como por exemplo quando se tem um usuário com determinado ID, nesses casos o atributo é iniciado pelo caractere ':'.

Quadro 12 – Rotas do Servidor API UNIBIO

Rota	Descrição
POST /monitoramento /usuario /{usuario} /biodigestor /{cod_biodigestor} /insere_leitura	Recebe a última leitura dos sensores do biodigestor e salva no banco de dados.
POST /monitoramento /usuario /{usuario} /biodigestor /{cod_biodigestor} /insere_fila	Recebe um conjunto de leituras que foram salvas off-line no dispositivo de monitoramento.
GET /monitoramento /usuario /{usuario} /central /{cod_central} /configuracao	Retorna as configurações do dispositivo de monitoramento.

Rota	Descrição
GET /monitoramento /usuario /{usuario} /central /{cod_central} /reinicio	Retorna se existe solicitação de reinício do sistema
GET monitoramento/ usuário /{usuário} /biodigestor /{cod_biodigestor} /requisicao	Retorna se existe solicitação de leitura para determinado biodigestor.
GET monitoramento/ data_hora	Retorna data e hora.
POST /usuario	Adiciona um novo usuário.
POST /usuário/validar	Valida usuário e senha.
POST /usuário/{usuário}/central	Cria uma central
POST /usuário/{usuário}/biodigestor	Cria um biodigestor.
POST /usuário/{usuário} /central /{cod_central} /relaciona_biodigestor	Relaciona um biodigestor a uma central
GET /biodigestor	Lista todos os biodigestores que têm visibilidade livre
GET /usuário/{usuário} /central	Lista todas as centrais de monitoramento UniBio;
GET /usuário/{usuário} /central /{cod_central} /biodigestor	Lista todos os biodigestores de uma central
GET /usuário/{usuário} /biodigestor	Lista todos os biodigestores do usuário

Fonte: Autor (2021)

A API foi desenvolvida na linguagem JavaScript utilizando as seguintes tecnologias:

- Node.js – RunTime de JavaScript para criar servidores web;
- Express.js – Framework para Node.js que facilita na criação de servidores HTTP.

3.4.3 Aplicativo Cliente Web

A seguir é apresentado como foi realizado a definição, modelagem e programação do sistema web cliente que terá a função de realizar o cadastro dos projetos de biodigestores e consultar de forma eficiente as informações consolidadas no banco de dados do sistema UNIBIO.

O aplicativo tem por função estabelecer para os usuários do sistema uma forma de interação com os dados obtidos pelo dispositivo de sensoriamento auxiliando no processo de análise dos biodigestores.

Através do aplicativo será possível ter acesso às leituras mais recentes do biodigestor, gráficos para análises, e um banco de dados de biodigestores para que se possa saber onde existem outros projetos.

O aplicativo foi feito para que várias pessoas possam usar, dessa forma é necessário entrar com um usuário e senha que é gerido pelo administrador. Ao entrar no aplicativo, o usuário terá acesso aos seus biodigestores. A partir do aplicativo os usuários podem:

- Ter acesso a gráficos dos biodigestores monitorados pelo controlador IoT UNIBIO;
- Monitorar em tempo real os biodigestores que utilizam o controlador IoT UNIBIO;
- Cadastrar novos biodigestores, que podem ter visibilidade pública, e serem monitorados ou não pelo controlador IoT UNIBIO;
- Acessar biodigestores públicos que foram criados por outros usuários;

Ao cadastrar um novo biodigestor, o usuário tem a opção de torná-lo público ou não, isso é referente à possibilidade de ser visível ou não para outros usuários, no menu de banco de dados de biodigestores do sistema.

O usuário também tem a possibilidade de cadastrar um biodigestor que não é monitorado pelo controlador IoT. Caso seja monitorado será gerado uma api-key, que é uma chave utilizada pelo dispositivo para ter acesso ao servidor API, essa chave é única para cada biodigestor e não deve ser compartilhada por questões de segurança.

Para implementação do aplicativo foram utilizadas duas ferramentas principais:

- Grafana – Para gerar os gráficos;
- Svelte.js – Framework utilizada na criação do aplicativo web.

3.4.4 Banco de Dados do Sistema UNIBIO

A seguir é apresentado como foi implementado e modelado o banco de dados no SGBD MySQL utilizado no sistema UNIBIO para que possa receber e enviar dados aos diversos subsistemas do projeto.

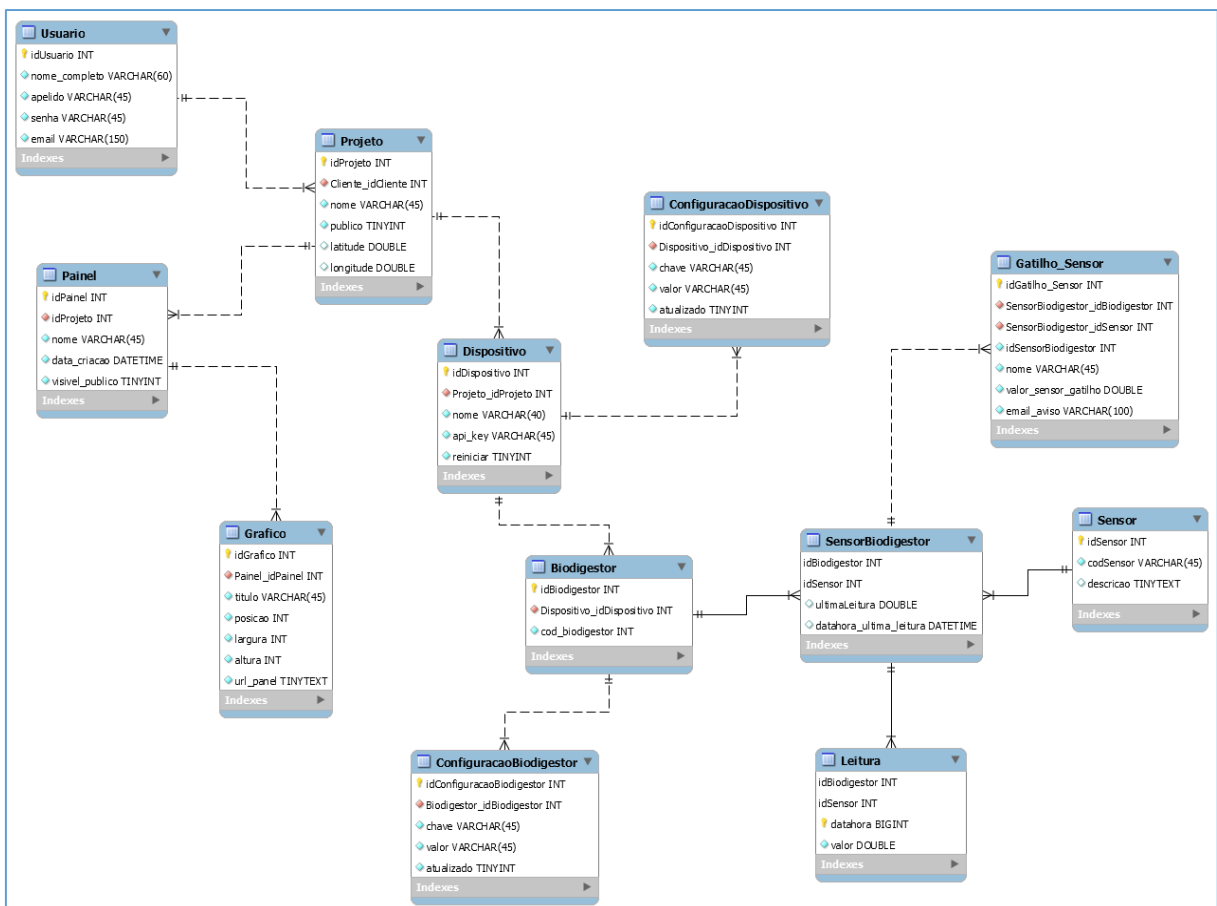
O banco de dados é responsável por salvar as leituras dos sensores do Módulo Controlador IoT, e para guardar dados essenciais para o funcionamento do aplicativo web cliente.

Para ter acesso a esse banco o aplicativo web, o controlador IoT e outras aplicações finais devem se comunicar com o servidor API, pois dessa forma não é necessário se preocupar com a manipulação e processamento de dados, assim é garantido a escalabilidade e diminui a complexidade.

O SGBD escolhido para a implementação foi o MySQL, por ter uma licença GPL e ter amplo suporte da comunidade, sendo um dos SGBDs mais utilizados no mercado atualmente.

Em questões de arquitetura, foi definido que existiria um banco de dados que guardaria as informações tanto do aplicativo web quanto dos dados sensores dos biodigestores. A modelagem do banco de dados foi feita seguindo a Normalização dos dados assim como está dito no Referencial Teórico, dessa forma foi garantido a velocidade das consultas, a escalabilidade do sistema e a prevenção de problemas futuros. Com esse modelo de Banco de Dados é possível adicionar novos biodigestores ao sistema sem a necessidade de alterações no código. O esquema segue o modelo apresentado na **Figura 51**.

Figura 51 – Modelo ER do Banco de Dados do Sistema UNIBIO



Fonte: Autor (2021)

3.5 Experimento de Biodigestão

Na quinta e última etapa da metodologia deste projeto de pesquisa, foi realizado um ensaio do processo de biodigestão, utilizando os elementos do projeto elencado nas etapas anteriores, no qual foram utilizados os 4 protótipos de biodigestores sensorizados com a alimentação de biomassa específica e aplicação dos elementos filtrantes de forma diversificada para o biogás.

A seguir, o sistema UNIBIO foi inicializado, no qual o processo foi monitorado eletronicamente durante todo o seu período ativo, e os dados coletados ficaram disponibilizados em tempo real para os subsistemas do projeto UNIBIO,

Esses dados podem ser consultados através de relatórios consolidados e gráficos de indicadores de desempenho, que será uma rica fonte de informações para o entendimento do comportamento de um biodigestor biológico na produção de biogás, e na análise do desempenho dos elementos filtrantes aplicados nos experimentos.

3.5.1 Localização do Experimento

O experimento com os protótipos de biodigestor será realizado em pelo menos 2 ciclos de repetições em iguais condições e com os mesmos métodos aplicados em cada ciclo com o objetivo de validar os dados dos experimentos.

O primeiro ciclo do experimento foi realizado no período entre 07/06/2020 até a data de 10/08/2020 no bairro Coaçu, cidade de Fortaleza, estado do Ceará nas coordenadas de latitude (-3.8414890), longitude (-38.482589) e altitude (28 metros).

O local onde foram montados os biodigestores recebe incidência solar direta entre às 09:00 horas e as 14:00 horas.

O segundo ciclo do experimento foi realizado no período entre 16/04/2021 até a data de 04/06/2021 no mesmo local da realização do primeiro ciclo.

3.5.2 Definição do Experimento: Processo de Biodigestão

O experimento se realizará em 4 protótipos de biodigestores sensorizados.

Cada câmara de biodigestor que possui 20 L de área útil receberá 18 L de biomassa.

A biomassa será composta por 9 L de esterco bovino fresco e 9 L de água potável em temperatura ambiente.

O esterco bovino deve ser pesado e ter seu volume previamente medido para que possa ser determinada a densidade da matéria orgânica utilizada no experimento.

A água utilizada no experimento deve ser límpida, potável, livre de contaminantes e livre de cloro; é desejável que a temperatura ambiente seja de 25 °C ou superior, até o limite de 32 °C, para uma ideal condição no início do processo de biodigestão e na preservação da vida biológica pré-existente na matéria orgânica.

Após a mistura do esterco bovino (9 L) com a água potável (9 L) origina-se o material denominado de biomassa. Este deve ser bem misturado para que se possa resultar em um material bem homogêneo.

Os protótipos serão identificados por: biodigestor 1, biodigestor 2, biodigestor 3, biodigestor 4.

O protótipo biodigestor 1 será o controle e será abastecido apenas com a biomassa (18 L) e não receberá nenhum tipo de filtro para o biogás.

O protótipo biodigestor 2 receberá além de 18 L de biomassa um elemento filtrante líquido, que será composto por uma coluna de 10 cm de água potável e ficará alojada na parte inferior da câmara do gasômetro.

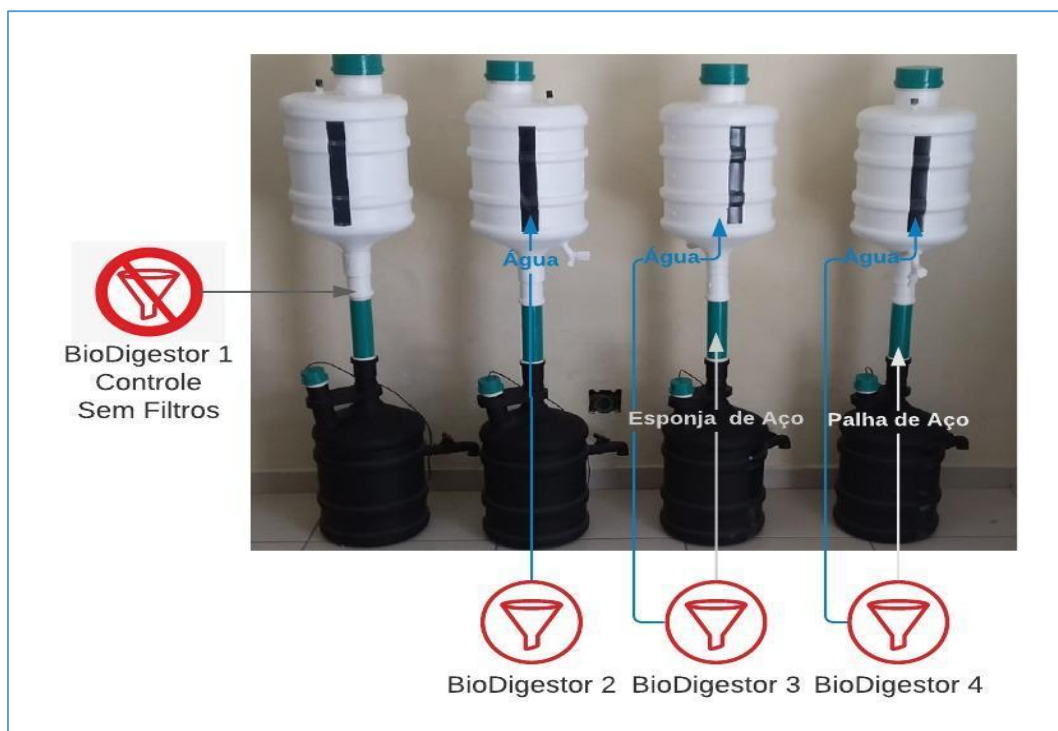
O protótipo biodigestor 3 receberá 18 L de biomassa e dois elementos filtrantes para o biogás: um filtro sólido que será composto por uma camada compactada de esponja de aço (aço carbono de estrutura fina esponjosa) alojada no compartimento de 20 cm de comprimento por 50 mm de diâmetro na área interna, e um filtro líquido que será composto por uma coluna de 10 cm de água potável no gasômetro por onde o biogás gerado passará por borbulhamento por essa coluna hídrica.

O protótipo biodigestor 4 também receberá 18 L de biomassa através do alimentador e dois filtros: um sólido e um líquido. No qual o filtro sólido será composto pelo material compactado de palha de aço (aço carbono de estrutura espessa e rígida) e o filtro líquido será composto por água potável em uma coluna de 10 cm pela qual o biogás será lavado antes de se alojar no gasômetro.

Após a alimentação dos quatro biodigestores com a respectiva biomassa e conjunto de filtros determinados para cada experimento, os módulos de sensores eletrônicos do sistema UNIBIO devem ser acoplados em cada biodigestor conforme sua identificação e o controlador IoT pode ser inicializado. Estando assim iniciado o processo de biodigestão e seu monitoramento em tempo real via plataforma IoT que deverá durar por até 60 dias.

Os materiais que serão aplicados no filtro foram determinados por (Paz, 2021) em estudo concomitante sobre desempenho de filtros para o biogás no processo de biodigestão que fará uso dos resultados obtidos neste estudo através do monitoramento no sistema UNIBIO. Na **Figura 52** é apresentado como foram dispostos os filtros nos quatro protótipos de biodigestores:

Figura 52 – Disposição dos Filtros nos Biodigestores



Fonte: Autor (2021)

3.5.3 Realização Experimento Biodigestão

O primeiro ciclo do experimento de biodigestão ocorrido em 07/06/2020 teve a participação dos pesquisadores (Andrade, Francisco) e (Paz, Deyk). Devido às medidas sanitárias que se aplicavam na região de isolamento social no período que ocorreu o experimento. Os trabalhos foram realizados presencialmente pelo pesquisador (Andrade, Francisco) e remotamente por videoconferência pela pesquisadora (Paz, Deyk). A **Figura 53** apresenta os preparativos para o início dos trabalhos do experimento.

Figura 53 – Fotografia dos preparativos experimento digestão anaeróbia



Fonte: Autor (2021)

Passo 1: inicialmente foram verificados e situados os equipamentos de EPI para um manejo dos materiais com segurança. Para os trabalhos a serem realizados os seguintes EPI's foram utilizados: Luvas de borracha, Máscara e Óculos.

Passo 2: Para o experimento haviam sido reservados 40 L de água potável da concessionária pública com um período de dormência de 72 horas para fins de evaporação do cloro existente no fluido. Neste passo foi feita a medição da temperatura da água tendo se obtido uma leitura de 25 °C na temperatura ambiente. Adequado para iniciarmos a preparação da biomassa para o processo de biodigestão.

Passo 3: Para o experimento foram adquiridos 3 baldes de 18 L cada de esterco bovino fresco adquiridos no mesmo dia em uma vacaria da região. Cada biodigestor fez o uso de 9 L do esterco de gado. Totalizando 36 L ($9 \text{ L} \times 4 = 36 \text{ L}$) da matéria orgânica para os 4 biodigestores do experimento. Neste passo os 3 baldes cheios com 18 L cada foram pesados obtendo-se os seguintes valores: balde 1 = 15,65 kg, balde 2 = 16,09 kg e balde 3 = 16,05 kg, já descontados o peso do balde plástico vazio. Para uma melhor homogeneidade na densidade da matéria orgânica foram utilizados no experimento os baldes 2 e 3 com respectivos pesos de 16,09 kg e 16,05 kg.

Passo 4: Neste passo foram realizadas a mistura e a homogeneização da biomassa. Os baldes 2 e 3 foram despejados em uma bacia com capacidade para 80 L. Em seguida os dois garrafões de água de 20 L foram despejados em dois baldes de 18 L para se ter a razão de 1 para 1 de Esterco bovino e água. Após a medição, os 36 L de água foram despejados no mesmo balde que o esterco. Após a mistura de água com esterco resultar em um volume de 72 L de biomassa foi feita a homogeneização com um motor elétrico ligado a um eixo para misturador de massas por 3 minutos. Ao final deste passo a biomassa está preparada.

Passo 5: Neste passo as câmaras de biodigestão dos biodigestores foram carregadas com biomassa através do duto alimentador. Cada biodigestor recebeu uma carga de 18 L da biomassa que foi preparada no passo anterior.

Passo 6: No passo seguinte foram carregados os compartimentos para filtro sólido. O compartimento do biodigestor 1 e 2 não receberam os filtros sólidos, pois a combinação com esses filtros só ocorrerá nos biodigestores 3 e 4. No porta-filtro sólido do biodigestor de número 3 foi inserida uma carga de esponjas de aço compactadas até que se atingisse a marcação da coluna de 20 cm do elemento filtrante. Já no porta-filtro sólido do biodigestor número 4 foram inseridos o elemento filtrante de palha de aço até atingir os 20 cm da coluna de filtro sólido. Na sequência os porta-filtros foram encaixados nos biodigestores equivalentes. Biodigestor 1 (sem filtro sólido), biodigestor 2 (sem filtro sólido), biodigestor 3 (filtro sólido de esponja de aço) e biodigestor 4 (filtro sólido de esponja de aço).

Passo 7: nesta etapa os gasômetros foram encaixados na parte superior dos porta-filtros sólidos e foram preenchidos através de uma mangueira pela parte superior do gasômetro com o filtro líquido que é uma coluna de água de 10 cm. Foram preenchidos os gasômetros dos biodigestores 2, 3 e 4. O biodigestor 1 por ser o exemplar de controle e não possuir nenhum filtro não foi abastecido com água no compartimento de filtro líquido.

Passo 8: neste momento as partes dos módulos sensores UNIBIO foram acoplados no biodigestor. A parte 1 (acoplamento de 100 mm) foi montado no gasômetro. A parte 2 (acoplamento de 50 mm) foi montado na câmara de biomassa. Após a conclusão desta etapa, os biodigestores estão fechados e prontos para o início do processo de biodigestão.

Passo 9: Nesta etapa os cabos oriundos do controlador IoT UNIBIO foram acoplados aos módulos sensores dos biodigestores. Cada cabo numerado de (“bio1”, “bio2”, “bio3” e “bio4”) foi conectado no módulo sensor do gasômetro dos respectivos biodigestores (biodigestor 1, biodigestor 2, biodigestor 3, biodigestor 4). Em seguida o conector do cabo da parte 2 do módulo sensor, que foi montado na câmara de biomassa, foi conectada ao terminal, para esse fim, na parte 1 do módulo sensor, que está montada no gasômetro.

Passo 10: Neste passo o módulo controlador IoT foi inicializado e neste momento iniciou-se o processo de monitoramento eletrônico da biodigestão, então os dados de todos os sensores dos quatro biodigestores começaram a ser coletados em uma frequência de 5 minutos e armazenados em um banco de dados na internet via plataforma microcontrolada IoT. Esse monitoramento funcionou até o fim do ciclo do processo de biodigestão.

Na **Figura 54** é apresentada a fotografia dos biodigestores alimentados e em operação.

Figura 54 – Fotografia dos Biodigestores em Operação



Fonte: Autor (2021)

Todo o processo de preparação e inicialização do experimento de biodigestão nos biodigestores sensorizados UNIBIO foram registrados em vídeo e estão disponíveis no link a seguir: <https://youtu.be/tWJlOKhrvdK>.

3.5.4 Medição Analisador de Gás GEM5000

Após a conclusão do ciclo de biodigestão foram realizadas medições nos gases armazenados nos quatro protótipos de biodigestores batelada com o equipamento profissional analisador de gás GEM5000, mostrado na **Figura 55**.

Figura 55 – Foto do equipamento GEM5000



Fonte: Autor (2021)

Na **Quadro 13** seguem os parâmetros em que foram realizadas as medições com o equipamento GEM5000:

Quadro 13 –Parâmetros de realização de medições

Equipamento	Quantidade de Leituras	Leitura considerada	Data Medição GEM5000	Data saturação UNIBIO
Biodigestor 1	4 sequenciadas	Última leitura	14/06/2021 às 09:46h	29/05/2021 às 14:04h*
Biodigestor 2	4 sequenciadas	Última leitura	14/06/2021 às 09:44h	29/05/2021 às 20:18h
Biodigestor 3	4 sequenciadas	Última leitura	14/06/2021 às 09:41h	29/05/2021 às 01:03h
Biodigestor 4	4 sequenciadas	Última leitura	14/06/2021 às 09:39h	29/05/2021 às 03:10h
*Biodigestor 1 – troca da câmara de ar por rompimento em 09/06/2021 as 12:00horas.				

Fonte: Autor (2021)

Os valores das quatro leituras sequenciais realizadas pelo equipamento GEM5000 nos biodigestores foram dispostas conforme apresentado na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Valores das leituras realizadas pelo GEM5000

BIODIGESTOR 1						BIODIGESTOR 2					
HORA		09:46	09:46	09:46	09:46	HORA		09:44	09:44	09:44	09:44
CH ₄	%	57,4	57,2	56,7	56,2	CH ₄	%	41	40,9	40,8	40,2
CO ₂	%	16,4	16,3	16,2	16,1	CO ₂	%	9,3	9,3	9,3	9,2
O ₂	%	5,3	5,3	5,3	5,4	O ₂	%	11,8	11,7	11,6	11,4
CO	ppm	39	39	39	39	CO	ppm	180	183	185	187
H ₂ S	ppm	8	8	8	8	H ₂ S	ppm	13	14	14	16
Bal	%	20,9	21,2	21,8	22,3	Bal	%	38	38,2	38,4	39,2
M+C	%	77,68	77,37	76,74	76,11	M+C	%	52,95	52,84	52,74	52,00
M%	%	73,89	73,93	73,89	73,85	M%	%	77,44	77,40	77,37	77,31
C%	%	21,11	21,07	21,11	21,15	C%	%	17,56	17,60	17,63	17,69
BIODIGESTOR 3						BIODIGESTOR 4					
HORA		09:41	09:41	09:41	09:41	HORA		09:39	09:39	09:39	09:39
CH ₄	%	43,3	39,7	39,8	39,8	CH ₄	%	32	32,8	33,1	32
CO ₂	%	3,2	3	3	3	CO ₂	%	4,5	4,7	4,7	4,6
O ₂	%	20,3	16	14,2	14	O ₂	%	16,1	14,2	13,7	13,8
CO	ppm	30	131	179	187	CO	ppm	121	162	174	170
H ₂ S	ppm	8	10	14	15	H ₂ S	ppm	3	8	14	18
Bal	%	33,1	41,3	43	43,2	Bal	%	47,4	48,3	48,5	49,6
M+C	%	48,95	44,95	45,05	45,05	M+C	%	38,42	39,47	39,79	38,53
M%	%	88,46	88,33	88,34	88,34	M%	%	83,29	83,09	83,19	83,06
C%	%	6,54	6,67	6,66	6,66	C%	%	11,71	11,91	11,81	11,94
CH ₄	Percentual de Gás Metano no Gasômetro					Bal	Balanço Residual N ₂ - Nitrogênio				
CO ₂	Percentual de Gás carbônico no Gasômetro					M+C	Biogás Ajustado: CH ₄ +CO ₂ =95%; outros Gases=5%.				
O ₂	Percentual de Gás Oxigênio no Gasômetro					M%	Percentual Gás Metano Ajustado				
CO	Concentração de Monóxido de Carbono					C%	Percentual Gás Carbônico Ajustado				
H ₂ S	Concentração de Gás Sulfídrico										

Fonte: Autor (2021)

A cada etapa de ciclo de saturação dos sensores dos biodigestores, que ocorrem com o enchimento das câmaras de ar nos gasômetros, ao se atingir o ponto de saturação máximo no sensor de metano que é de 10.000 ppm. O sistema era esvaziado para reinício do monitoramento do processo de geração de biogás, esse processo foi repetido 5 vezes em cada biodigestor durante o ciclo completo do processo de digestão anaeróbia.

Devido a impossibilidade de criação de vácuo nos gasômetros a posição inicial de medição se dava em condições com a presença de ar atmosférico que permanecia no sistema até o próximo ciclo. Os valores captados pelo equipamento GEM5000 identificam a proporção desses valores presente no biogás, no caso na coluna (M + C) – Biogás Ajustado, é feita a compensação considerando o biogás padrão com carga de CH₄+CO₂ a 95% e demais gases a 5% para encontrar os valores percentuais presentes no biogás da relação de Gás Metano e Gás Carbônico através das fórmulas:

- Biogás = (Metano + Dióxido de Carbono)95% + (Outros Gases)5%

$$M + C = (\% \text{CH}_4 + \% \text{CO}_2) \times 100 / 95 \quad (1)$$

- M% Percentual de Metano Ajustado

$$\% \text{CH}_4 / (M + C) \times 100 \quad (2)$$

- C% Percentual de Dióxido de Carbono Ajustado

$$\% \text{CO}_2 / (M + C) \times 100 \quad (3)$$

Para o estudo de filtros interessa a proporção de relação entre o Gás Metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂) presente no Biogás que na tabela acima são respectivamente as colunas M% e C%, além da concentração de gás sulfídrico (H₂S) representado na tabela pela coluna H₂S.

3.6 Sensores

Os sensores são dispositivos eletrônicos que enviam sinais elétricos de acordo com a variação do fenômeno físico ou químico que eles se propõem a medir, com o objetivo de relacionar informações através do sinal de saída com a grandeza que se deseja medir, como temperatura, velocidade, corrente, entre outras. Existem 2 tipos de sensores, os sensores digitais e os sensores analógicos (THOMAZINI e DE ALBUQUERQUE, 2020).

Os sensores analógicos são componentes eletrônicos sensíveis à alguma grandeza física que podem assumir qualquer valor no seu sinal de saída ao longo do tempo, desde que esteja na sua faixa de operação. Sensores digitais apenas assumem dois valores, normalmente ligado ou desligado, como por exemplo pressostatos, chaves de níveis (THOMAZINI e DE ALBUQUERQUE, 2020).

Alguns sensores digitais são compostos por dispositivos transdutores, onde possuem um sensor analógico e um circuito eletrônico, que realizam um pré-processamento na leitura e a codificam em um sinal digital, assim o usuário do sensor apenas tem que decodificar o sinal conforme descrito no manual do sensor (THOMAZINI e DE ALBUQUERQUE, 2020).

Os sensores podem entregar dois tipos de valores, uma leitura binária discreta, ou seja, ativado ou desativado, ou um valor contínuo, que tem valores dentro de um determinado intervalo (THOMAZINI e DE ALBUQUERQUE, 2020).

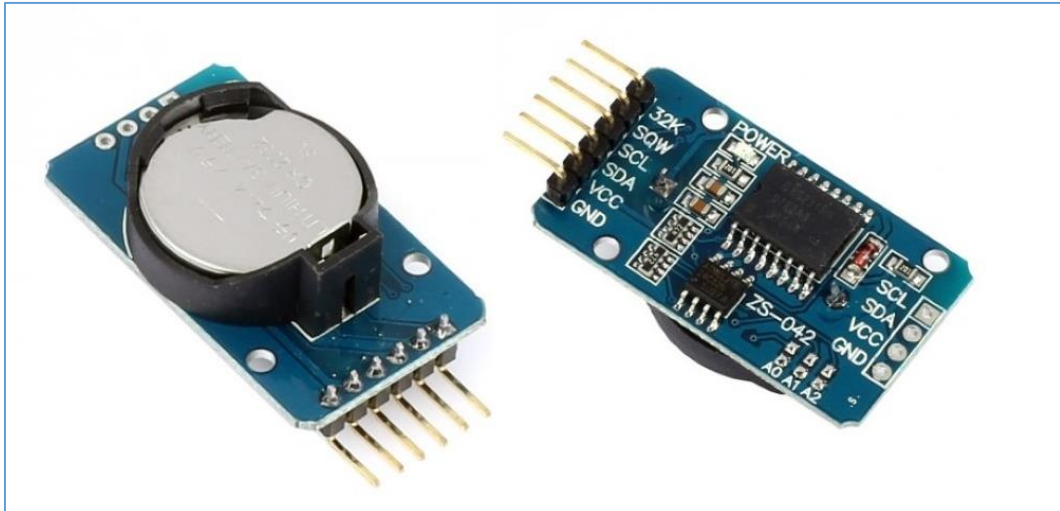
3.6.1 Sensores de Temperatura e Umidade

Sensores de temperatura tem como objetivo medir a variação de temperatura em um determinado ambiente ou objeto. No projeto foi utilizado 3 sensores para medir 3 ambientes diferentes, que estão listados a seguir.

3.6.1.1 DS3231 – Sensor digital de temperatura do módulo RTC

Para medir a temperatura ambiente foi utilizado o sensor de temperatura presente no módulo de RTC (Real Time Clock) DS3231, pois fica na área externa aos biodigestores e tem fácil implementação no código, pois já existe uma biblioteca pronta para o Arduino. Na **Figura 56** é apresentado o RTC DS3231.

Figura 56 – Fotografia do módulo RTC DS3231



Fonte: Página do DS3231 no site FilippiFlop⁵

O DS3231 é um real-time clock de baixo custo, altamente preciso, com um cristal oscilador compensado por temperatura da fabricante 'Maxin Integrated'. O dispositivo possui uma entrada de bateria que mantém o tempo preciso enquanto a alimentação principal é interrompida. O RTC mantém os segundos, minutos, horas, dia, dia da semana, mês e ano com compensação de ano bissexto. Além do RTC o dispositivo também oferece um sensor digital de temperatura. (Informações retiradas do datasheet do módulo⁶).

O dispositivo tem as seguintes características:

- Precisão de mais ou menos 2 ppm;
- Temperatura de operação entre (0° e 70°);
- Tensão de operação de 3.3 V, com máximo de 5.5 V;
- Compensação de temperatura;
- Rápida interface serial;
- Função de alarme, podendo ser até 2.

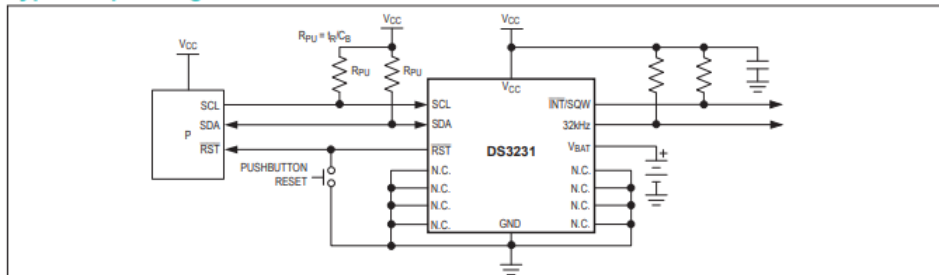
⁵ Disponível em: <www.filipeflop.com/produto/real-time-clock-rtc-ds3231/>. Acesso em 23 mar. 2021

⁶ **Datasheet do DS3231.** Disponível em: <cdn-shop.adafruit.com/product-files/3013/DS3231.pdf>. Acesso em 23 mar. 2021.

Na **Figura 57** é apresentado o circuito típico de operação do DS3231. E na **Figura 58** como o dispositivo foi usado no Projeto com o Arduino Mega.

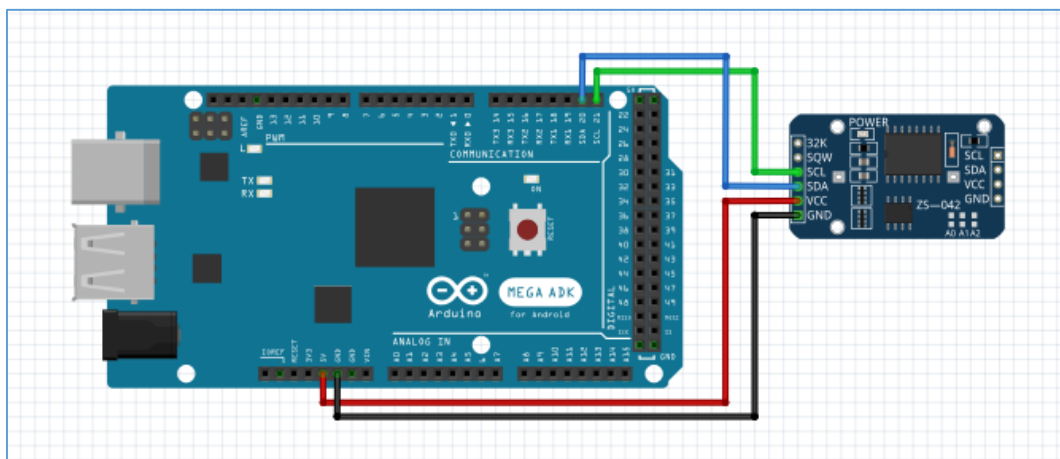
Figura 57 – Circuito típico de operação do DS3231

Typical Operating Circuit



Fonte: Datasheet do DS3231 (2015)

Figura 58 – Esquema de ligação do Arduino com o DS3231

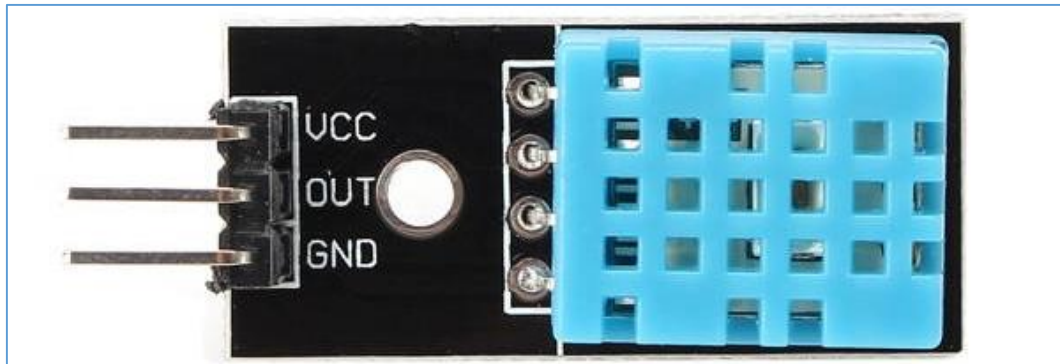


Fonte: Autor (2021)

3.6.1.2 DHT11 – Sensor digital de temperatura e umidade

Para medir a temperatura e a umidade dentro do gás, foi utilizado o sensor digital de modelo DHT11. Foi utilizado esse dispositivo pois integrado nele existem 2 sensores, um de temperatura e o outro de umidade, além de possuir uma biblioteca pronta para utilizar no Arduino. O sensor DHT11 é apresentado na **Figura 59**.

Figura 59 – Fotografia do sensor DHT11



Fonte: Página do DHT11 no site FilipiFlop⁷

DHT11 é um dispositivo com saída de sinal digital, fabricado por ‘Aosong Eletronics Co. Ltd.’, combinado de dois sensores calibrados, um de temperatura e o outro de umidade. O dispositivo promete entregar alta confiabilidade e excelente estabilidade a longo prazo. O DHT11 inclui um sensor resistivo de umidade e um dispositivo de medição de temperatura NTC, conectado com um microcontrolador de 8 bits de alto desempenho. (Informações retiradas do datasheet do dispositivo⁸).

O DHT11 tem as seguintes características:

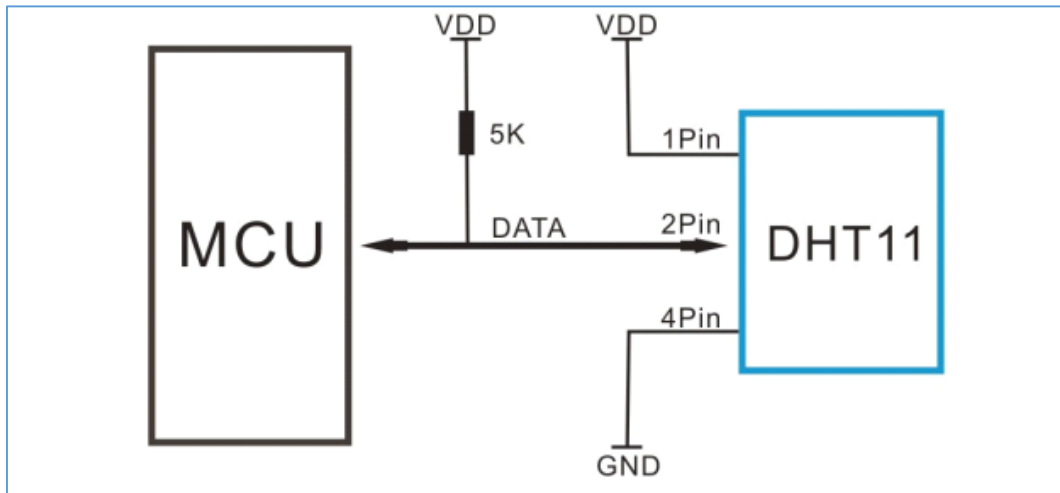
- Tensão de alimentação de 3.5 V a 5.5 V;
- Medição da umidade entre 20% e 90%;
- Medição da temperatura entre 0 °C e 50 °C;
- Umidade com 5% de precisão;
- Temperatura com 2% de precisão;
- Comunicação Serial de 1 fio bidirecional;
- Transmissão de longo alcance

⁷ Disponível em: <https://www.filipiflop.com/produto/modulo-sensor-de-umidade-e-temperatura-dht11-ky-015/>, Acesso em: 23 mar. 2021.

⁸ **Datasheet do DHT11.** Disponível em: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>, Acesso em: 23 mar. 2021.

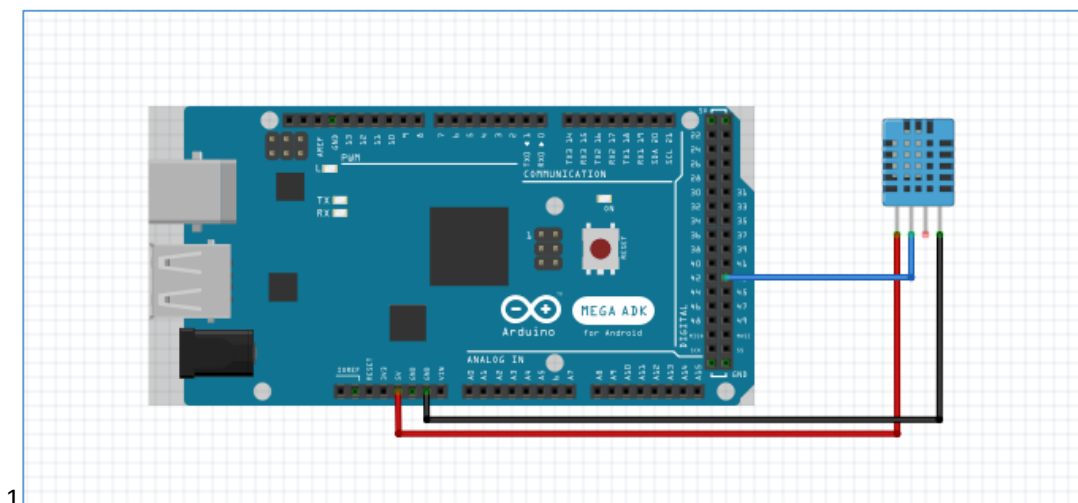
Na **Figura 60** é apresentado o circuito de operação típico, segundo o datasheet. Na **Figura 61** é apresentado como o sensor foi utilizado no projeto.

Figura 60 – Circuito de operação típica do DHT11



Fonte: Datasheet do DHT11

Figura 61 – Esquema de ligação do Arduino e do sensor DHT11



1

Fonte: Autor (2021)

3.6.1.3 DS18B20 – Sensor digital de temperatura

Para medir a temperatura dentro da biomassa foi usado o sensor digital de temperatura de modelo DS18B20, pois além de ser digital e preciso, possui proteção a prova de água, assim podendo ser mergulhado dentro da biomassa. O DS18B20 é apresentado na **Figura 62**.

Figura 62 – Fotografia do sensor DS18B20



Fonte: Página do DS18B20 no site FilipiFlop⁹

O DS18B20 é um termômetro digital, fabricado pela 'Maxin Integrated', que provê medição da temperatura Celsius e possui uma função não volátil de alarme programável. O dispositivo por definição se comunica através de apenas 1 fio, sendo necessário a conexão terra e a alimentação. O DS18b20 também pode derivar a alimentação da conexão de dados, eliminando a necessidade de uma alimentação externa. (Informações retiradas do datasheet do dispositivo¹⁰).

O DS18B20 possui as seguintes características:

- Interface 1-Wire que requer apenas uma porta para se comunicar com vários dispositivos;
- Alimentação Parasita, quando a alimentação derivar da conexão de dados;

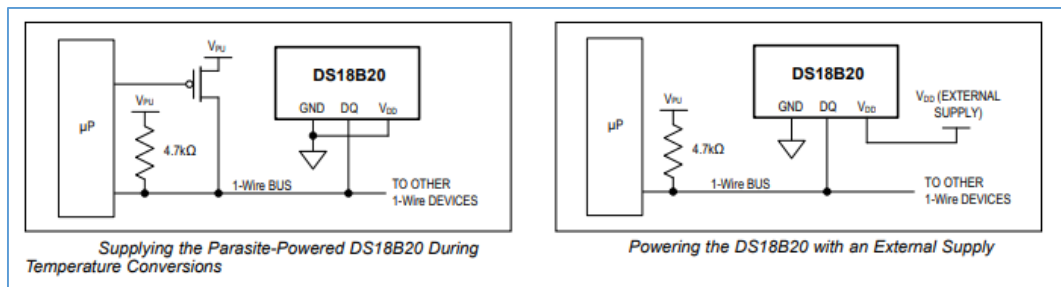
⁹ Disponível em: www.filipeflop.com/produto/sensor-de-temperatura-ds18b20-a-prova-dagua/ , Acesso em: 23 mar. 2021.

¹⁰ **Datasheet do DS18B20**. Disponível em: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> , Acesso em: 23 mar. 2021.

- Tensão de alimentação de 3.0 V a 5.0 V;
- Medição da temperatura de -55 °C a 125 °C;
- Alarme programável pelo usuário;

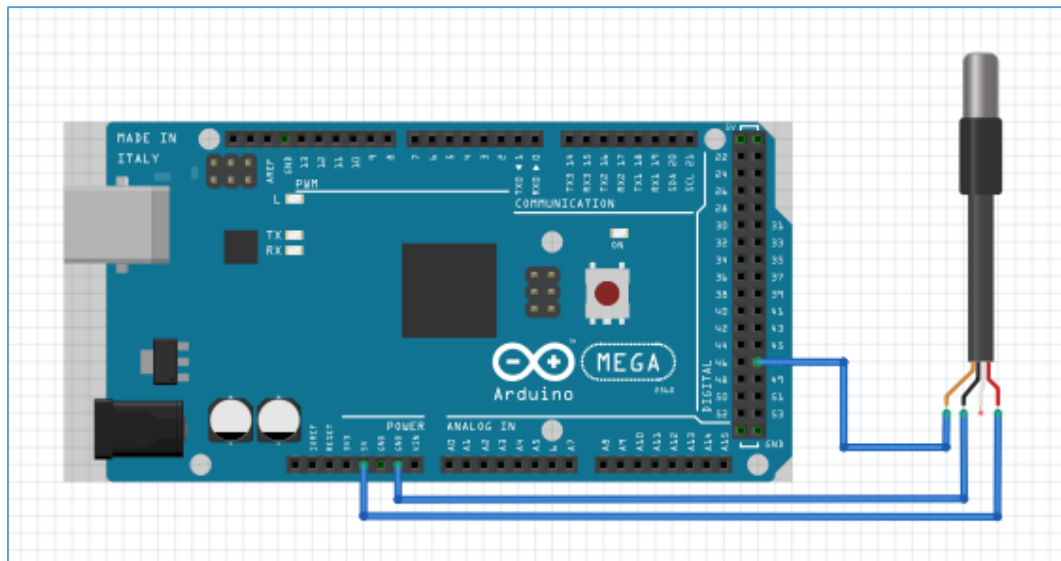
Na **Figura 63** são apresentadas as possibilidades de conexão do DS18B20, e na **Figura 64** é apresentado como o dispositivo foi utilizado no projeto.

Figura 63 – Circuitos operacionais típicos do sensor DS18B20



Fonte: Datasheet do DS18B20 (2019)

Figura 64 – Esquema de ligação do Arduino e o sensor DS18B20



Fonte: Autor (2021)

3.6.1.4 HR202L – Sensor higrômetro

Para medir a umidade no ambiente, fora da câmara de gás, foi utilizado o sensor analógico HR202L, fabricado pela 'AOSONG Eletronics'. Na **Figura 65** é apresentada uma foto do dispositivo. Os valores de leitura deste higrômetro foram utilizados como parâmetro de referência para a calibração dos módulos sensores dos biodigestores.

Figura 65 – Foto do sensor HR202L



Fonte: Datasheet do sensor HR202L

O higrômetro HR202L é um componente de material polímero orgânico sensível à umidade, que possui uma ampla faixa de leitura, resposta rápida à alteração de umidade, capacidade antipolvente, sem a necessidade de preocupação com a limpeza e promete uso de longa duração sem perda de performance. (Informações retiradas do Datasheet do HR202L¹¹).

Esse higrômetro é utilizado em medidores de temperatura e umidade, relógios digitais com temperatura e umidade, monitoramento da umidade ambiente atmosférica, processo industrial de controle, agricultura, instrumentos de medição, entre outros.

¹¹ **Datasheet do HR202L**. Disponível em: <https://datasheetpdf.com/datasheet/HR202L.html> , Acesso em: 23 mar. 2021.

Na **Quadro 14** são apresentadas as especificações técnicas desse sensor.

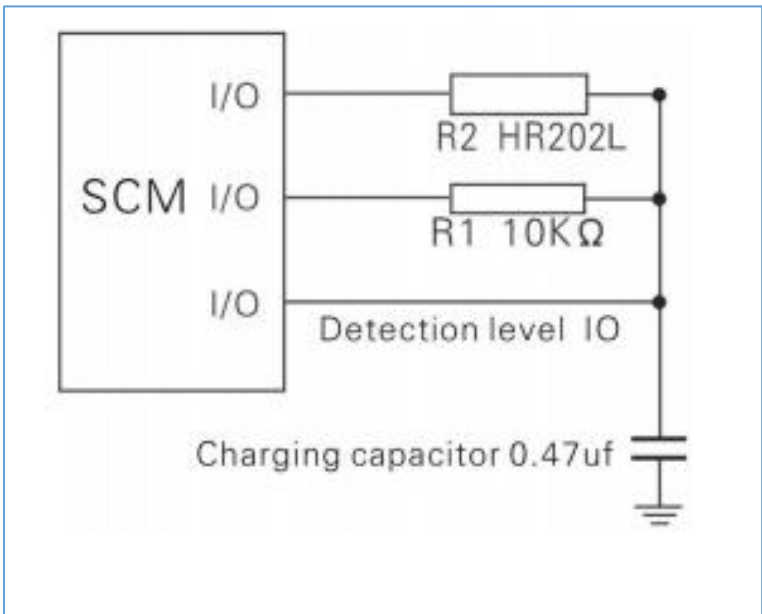
Quadro 14 – Especificações do sensor HR202L

Parâmetro	Especificação
Tensão fixa	1.5V AC
Potência fixa	0.2 mW
Frequência de operação	500 Hz ~ 2 kHz
Temperatura de operação	0 ~ 60 °C
Faixa de umidade	0 ~ 95% RH
Tempo de resposta	≤ 20S; desumidificação ≤ 40S
Estabilidade	≤ 1% RH / ano
Faixa de resistência	19.8 ~ 50.2 kOhm
Exatidão da detecção de umidade	± 5% RH

Fonte: Adaptado do datasheet do sensor HR202L (2018)

Na **Figura 66** é apresentado o circuito de utilização operacional típico do sensor HR202L.

Figura 66 – Circuito operacional típico do sensor HR202L



Fonte: Datasheet do sensor HR202L (2021)

3.6.2 Sensores de Concentração de Gases

3.6.2.1 MQ-4 – Sensor analógico de gás metano

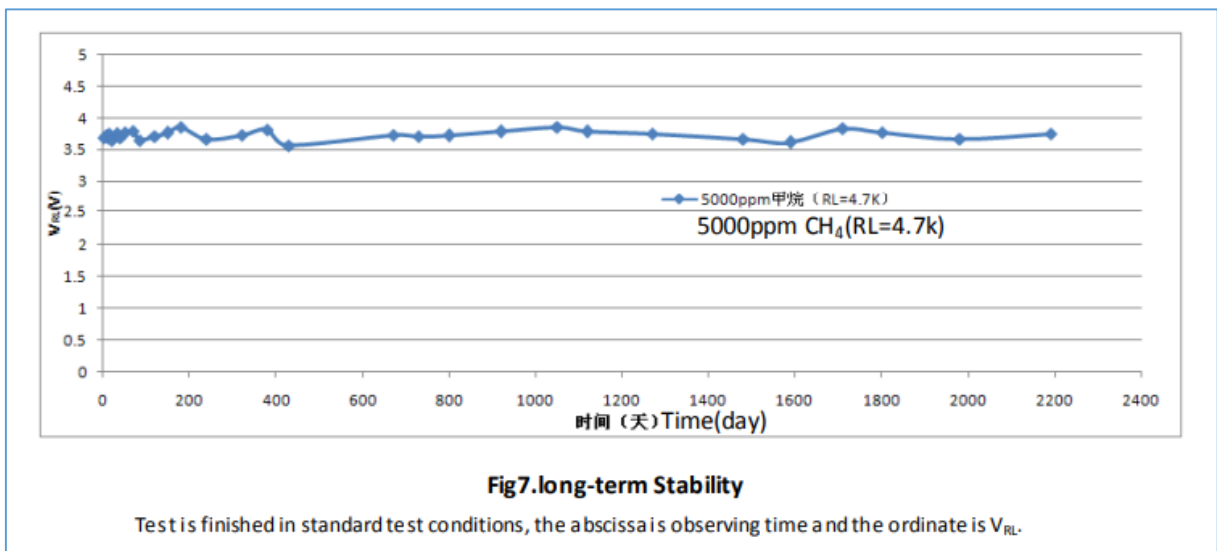
Para medir a concentração de gás metano (CH₄) dentro da câmara de gás e para verificar vazamentos foi utilizado o sensor analógico de modelo MQ-4 da fabricante ‘Winsen Eletronics’.

O material sensível do MQ-4 é o Dióxido de Estanho (SnO_2), onde possui pouca condutividade ao ar livre. Quando o gás inflamável existe, a condutividade do sensor aumenta à medida que a quantidade do gás também aumenta. Os usuários do sensor podem converter a alteração de condutividade para corresponder à concentração de gás através de um simples circuito. (Informações retiradas do Datasheet do sensor¹²)

Esse sensor foi escolhido para o projeto por conter boa sensibilidade ao gás metano, anti-interferência a álcoois e outros gases, longo tempo de vida e baixo custo. Esse sensor é bastante utilizado em alarmes de vazamento de gás doméstico, alarme de gás inflamável, ambientes industriais e em detectores portáteis de gases.

Na **Figura 67** são apresentados os resultados de um teste feito pela fabricante para viabilizar o uso de longo prazo em altas concentrações de gases. O teste mostra que no período de 2200 dias o sensor apresentou constância na medição do gás. Os resultados se mostram satisfatórios e atendem os requisitos do projeto, pois os sensores estarão em contato com altas concentrações de gás metano por um período de aproximadamente 60 dias.

Figura 67 – Teste de estabilidade do sensor MQ-4 à longo prazo



Fonte: Datasheet do MQ-4 (2014)

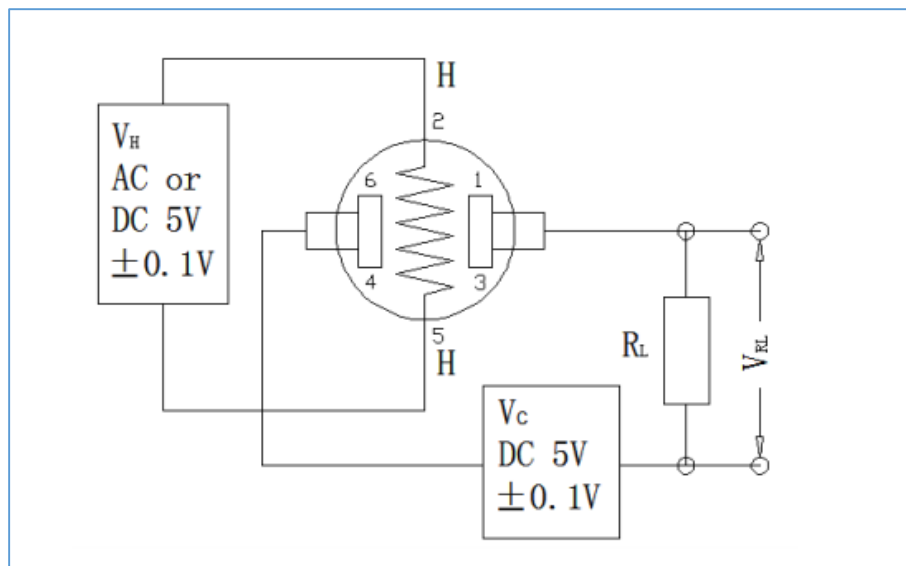
¹² **Datasheet do MQ-4.** 2014. Disponível em: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-4%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf> , Acesso em: 23 mar. 2021.

Características do sensor:

- Mede de 300 ppm até 10000 ppm;
- Tensão de operação de 5 V, compatível com o projeto;
- Resistência de aquecimento de 26 Ohm;
- Resistência de carga ajustável, normalmente 1 kOhm;
- Tempo de aquecimento de 48 horas;
- Tempo de vida de 10 anos;
- Baixo custo;
- Muito utilizado no mercado nacional;
- Anti-interferência a álcoois e outros gases;
- Circuito simples de utilização.

Na **Figura 68** é apresentado como esse sensor é utilizado na maioria das aplicações. No circuito deve-se ligar a resistência de aquecimento em 5 V (representado por H na imagem), então colocar uma resistência de carga R_L de 1 kOhm em série com o sensor. Para fazer a medição deve-se encontrar a tensão no resistor de carga R_L , que vai variar pois a resistência do material sensetivo irá variar.

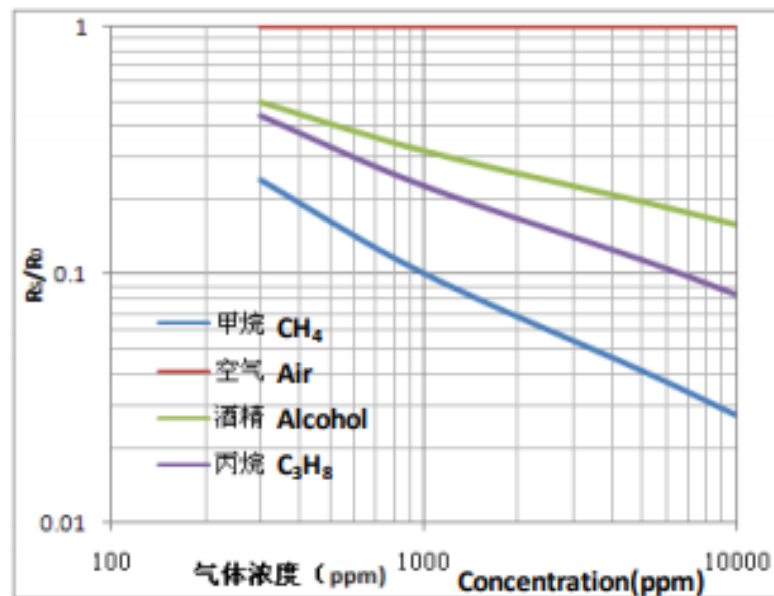
Figura 68 – Circuito operacional típico do sensor MQ-4



Fonte: Datasheet do MQ-4 (2014)

Na **Figura 69** é apresentado a variação de condutividade do sensor de acordo com a variação da concentração dos gases. O eixo das ordenadas representa a razão entre R_S (resistência do sensor em diferentes concentrações do gás desejado) e R_O (resistência do sensor no ar livre). O eixo das abscissas representa a concentração dos gases.

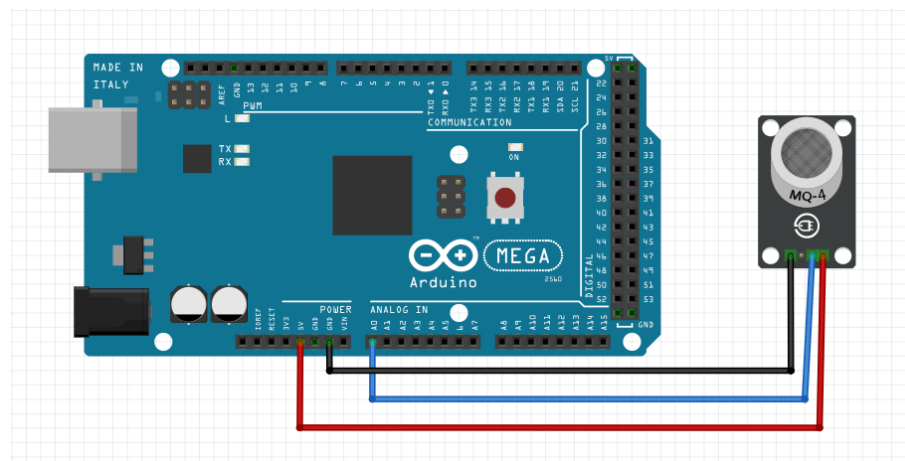
Figura 69 – Gráfico da variação de resistência do sensor MQ-4



Fonte: Datasheet do MQ-4 (2014)

A **Figura 70** apresenta como o sensor se conecta ao microcontrolador. O módulo utilizado já possui a resistência de carga R_L , que é de 1 kOhm.

Figura 70 – Esquema de ligação do Arduino e do sensor MQ-4



Fonte: Autor (2021)

A **Figura 71** apresenta o quadro de parâmetros técnicos do sensor MQ-4, exibindo também as suas medidas físicas.

Figura 71 – Parâmetros técnicos do sensor MQ-4

Technical Parameters			Stable.1
Model			MQ-4
Sensor Type			Semiconductor
Standard Encapsulation			Bakelite, Metal cap
Target Gas			Methane
Detection range			300~1000ppm(CH ₄)
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V _c	≤24V DC
	Heater Voltage	V _H	5.0V±0.1V AC or DC
	Load Resistance	R _L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R _H	26Ω±3Ω(room tem.)
	Heater consumption	P _H	≤950mW
	Sensitivity	S	R _s (in air)/R _s (in 5000ppmCH ₄)≥5
	Output Voltage	V _s	2.5V~4.0V (in 5000ppm CH ₄)
	Concentration Slope	α	≤0.6(R _{5000ppm} /R _{1000ppm} CH ₄)
Standard test conditions	Tem. Humidity		20°C±2°C; 55%±5%RH
	Standard test circuit		V _c :5.0V±0.1V; V _H :5.0V±0.1V
	Preheat time		Over 48 hours

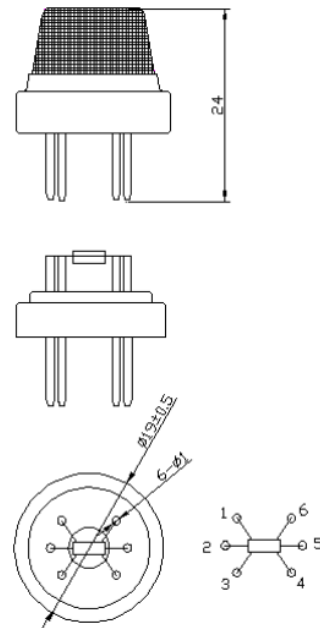


Fig1. Sensor Structure
Unit: mm

Fonte: Datasheet do MQ-4 (2014)

3.6.2.2 MQ-136 – Sensor analógico de gás sulfídrico

Para medir a concentração de gás sulfídrico (H₂S) dentro da câmara de gás foi utilizado o sensor analógico de modelo MQ-136 da fabricante 'Winsen Eletronics'.

O material sensível do MQ-136 é o Dióxido de Estanho (SnO₂), onde possui pouca condutividade ao ar livre. Quando o gás sulfídrico existe, a condutividade do sensor aumenta à medida que a quantidade do gás também aumenta. Os usuários do sensor podem converter a alteração de condutividade para corresponder à concentração de gás através de um simples circuito. (Informações retiradas do datasheet do sensor¹³)

¹³ **Datasheet do MQ-136.** Disponível em: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ136%20\(Ver1.4\)%20-%20Manual.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ136%20(Ver1.4)%20-%20Manual.pdf)
Acesso em: 23 mar. 2021

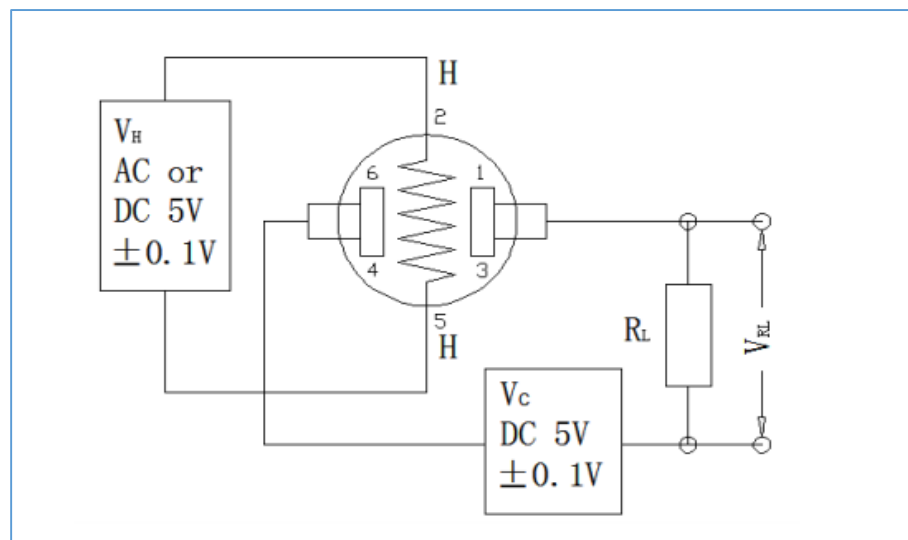
Esse sensor foi escolhido para o projeto por conter boa sensibilidade ao gás sulfídrico, ser pouco sensível a outros gases, ter longo tempo de vida e baixo custo. Esse sensor é bastante utilizado em alarmes de gás sulfídrico, em ambientes industriais e detectores portáteis de gases.

Características do sensor:

- Medição de 1 a 200 ppm;
- Tensão de operação de 5 V, compatível com o projeto;
- Resistência de aquecimento de 29 Ohm;
- Resistencia de carga R_L ajustável, normalmente 1 kOhm;
- Tempo de aquecimento de 48 horas;
- Tempo de vida de 10 anos;
- Baixo custo;
- Muito usado no mercado;
- Pouco sensível a outros gases;
- Circuito simples de utilização.

Na **Figura 72** é apresentado como esse sensor é utilizado na maioria das aplicações. No circuito deve-se ligar a resistência de aquecimento em 5 V (representado por H na imagem), então colocar uma resistência de carga R_L de 1 kOhm em série com o sensor. Para fazer a medição deve-se encontrar a tensão no resistor de carga R_L , que vai variar pois a resistência do material sensetivo irá variar.

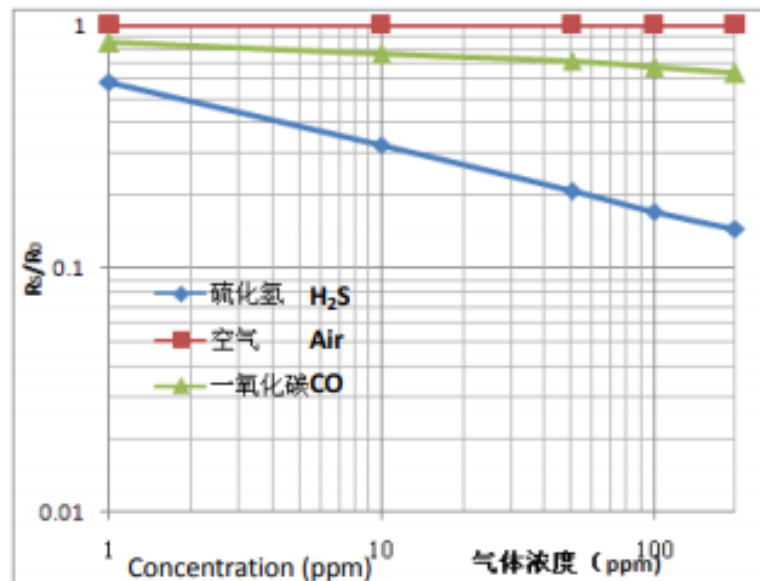
Figura 72 – Circuito operacional típico do sensor MQ-136



Fonte: Datasheet do MQ-136 (2015)

Na **Figura 73** é apresentada a variação de condutividade do sensor de acordo com a variação da concentração dos gases. O eixo das ordenadas representa a razão entre R_S (resistência do sensor em diferentes concentrações do gás desejado) e R_O (resistência do sensor no ar livre). O eixo das abscissas representa a concentração dos gases.

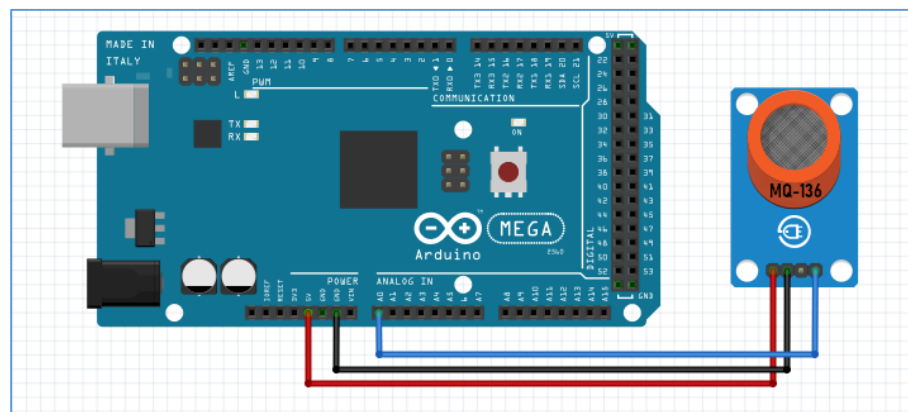
Figura 73 – Gráfico de alteração de resistência do sensor MQ-136



Fonte: Datasheet do MQ-136 (2015)

A **Figura 74** apresenta como o sensor se conecta ao microcontrolador. O módulo utilizado já possui a resistência de carga R_L , que é de 1 kOhm.

Figura 74 – Esquema de ligação do Arduino e do sensor MQ-136

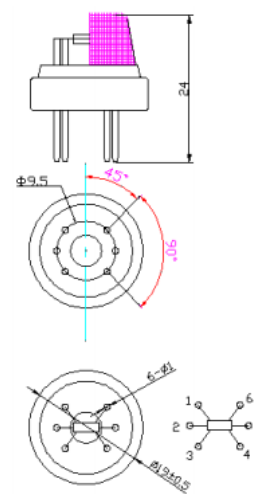


Fonte: Autor (2021)

A **Figura 75** apresenta o quadro de parâmetros técnicos do sensor MQ-136, exibindo também as suas medidas físicas.

Figura 75 – Parâmetros técnicos do sensor MQ-4

Model		MQ136	
Sensor Type		Semiconductor	
Standard Encapsulation		Bakelite, Metal cap	
Target Gas		Hydrogen Sulfide(H ₂ S gas)	
Detection range		1~200ppm	
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V _L	≤24V DC
	Heater Voltage	V _H	5.0V±0.1V AC or DC
	Load Resistance	R _L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R _H	29Ω±3Ω (room tem.)
	Heater consumption	P _H	≤900mW
	Sensitivity	S	R _S (in air)/R _S (50ppm H ₂ S) ≥3
	Output Voltage	ΔV _S	≥0.5V(in 50ppm H ₂ S)
Standard test conditions	Concentration Slope	α	≤0.6(R _S 200ppm/R _S 50ppm H ₂ S)
	Tem. Humidity	20℃±2℃ ; 55%±5%RH	
	Standard test circuit	V _L : 5.0V±0.1V; V _H : 5.0V±0.1V	
		Preheat time	
		Over 48 hours	



Fonte: Datasheet do MQ-136 (2015)

3.6.2.3 MH-Z19B – Sensor infravermelho de gás carbônico

Para medir a concentração de gás carbônico (CO₂) na câmara de gás foi utilizado o sensor digital infravermelho de gás carbônico MH-Z19B da fabricante 'Winsen Electronics'.

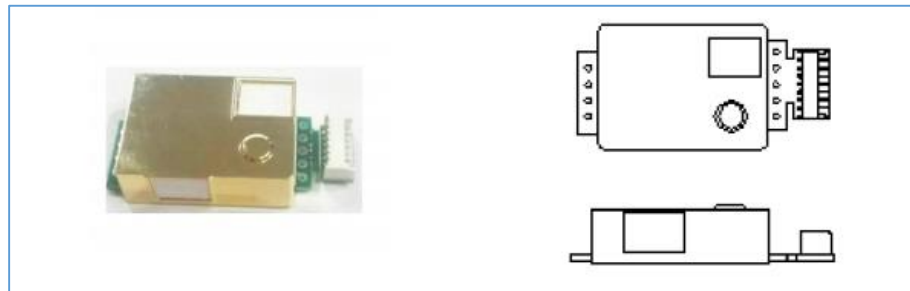
O MH-Z19B utiliza o princípio de infravermelho não dispersivo (NDIR) para detectar a existência de gás carbônico no ar, tendo uma boa seletividade além de ser não dependente do gás oxigênio. Aplica compensação de temperatura e possui saídas UART e PWM. Foi desenvolvido pela forte integração de uma tecnologia madura de detecção infravermelho de gás de absorvido, um desenho de circuito óptico preciso e um refinado circuito elétrico. (Informações retiradas do Datasheet do MH-Z19B¹⁴,2020)

Esse sensor foi escolhido para o projeto por ter boa sensibilidade, boa estabilidade, possuir uma interface de comunicação simples e fácil, possuir bom tempo de vida e ser a prova de água e de corrosão, o que é muito importante levando em conta o ambiente hostil dentro da câmara de gás. É muito utilizado em sistemas

¹⁴ **Datasheet do MH-Z19B.** 2020. Disponível em: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/ndir-co2-sensor/mh-z19b-co2-manual\(ver1_6\).pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/ndir-co2-sensor/mh-z19b-co2-manual(ver1_6).pdf) , Acesso em: 23 mar. 2021.

de refrigeração HVAC, projetos de casas inteligentes, sistemas de ventilação, escolas, testes de qualidade do ar e dispositivos limpadores de ar. Na **Figura 76** é apresentada a estrutura do sensor MH-Z19B.

Figura 76 – Estrutura do sensor MH-Z19B



Fonte: Datasheet do sensor MH-Z19B (2020)

O MH-Z19B possui as seguintes características:

- Detecção de 0 a 5000 ppm;
- Tensão de operação compatível com 5 V;
- Dois tipos de saída do sinal:
 - UART: Interface Comunicação Serial com o dispositivo, sendo necessário dois fios;
 - PWM: Técnica de modulação de sinal, sendo necessário apenas um fio;
- Tempo de aquecimento de 3 minutos;
- À prova de água e vapor de água;
- À prova de corrosão;
- Tempo de vida de 5 anos;
- Compensação de temperatura, provendo uma excelente saída linear;
- Boa estabilidade e boa sensibilidade;

Para receber o sinal do sensor, existem duas opções, a comunicação serial UART ou o sinal modulado PWM. A leitura por PWM possui uma limitação na concentração máxima que pode ser obtida de até 2000 ppm, por essa razão no projeto foi utilizado a comunicação serial UART, onde pode se ter uma leitura de até 5000 ppm. No **Quadro 15** são apresentadas as características dos intervalos de leituras.

Quadro 15 – Intervalos de leituras do sensor MH-Z19B

Gás detectado	Fórmula	Intervalo	Interface	Exatidão
Dióxido de Carbono	CO ₂	0 ~ 2000 ppm	PWM	± (50 ppm + 5% leitura)
		0 ~ 5000 ppm	UART	

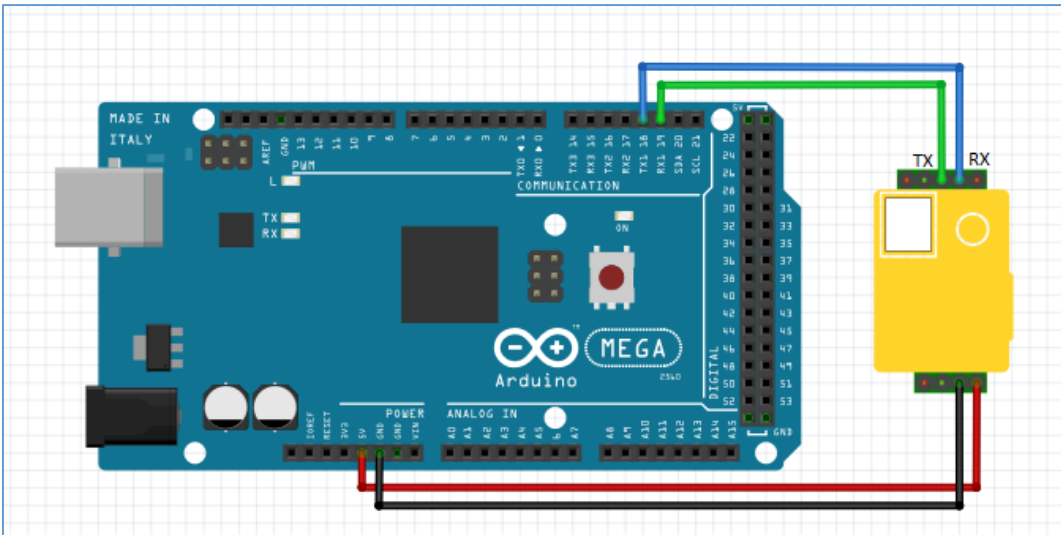
Fonte: Adaptado do datasheet do MH-Z19B (2020)

Para usar a serial é necessário selecionar a taxa de transmissão para 9600, 8 bits de dados, 1 bit de parada, sem bit de paridade. Pela UART é possível:

- Ler a concentração de CO₂;
- Calibrar o ponto zero, isto é, quando está ao ar livre;
- Calibrar um ponto específico, quando está sobre outra concentração, mas é necessário informar o valor.

Na **Figura 77** é apresentado como é o esquema de ligação entre o Arduino e a interface de comunicação serial do MH-Z19B.

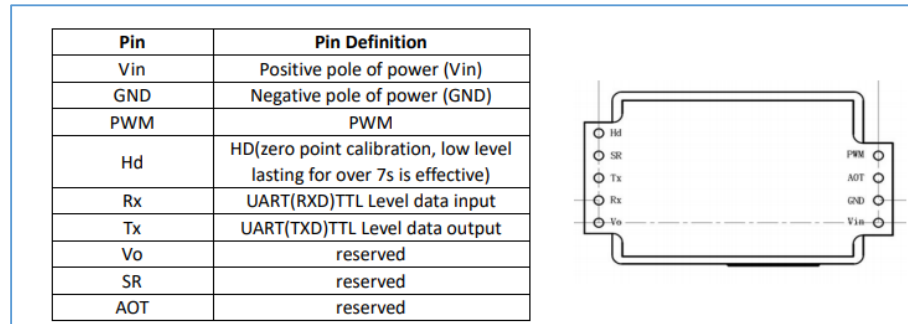
Figura 77 – Esquema de ligação do Arduino e do sensor MH-Z19B



Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 78** são apresentados os pinos do sensor MH-Z19B.

Figura 78 – Pinos do sensor MH-Z19B



Fonte: Datasheet do sensor MH-Z19B

Na **Quadro 16** são apresentadas as especificações do sensor MH-Z19B.

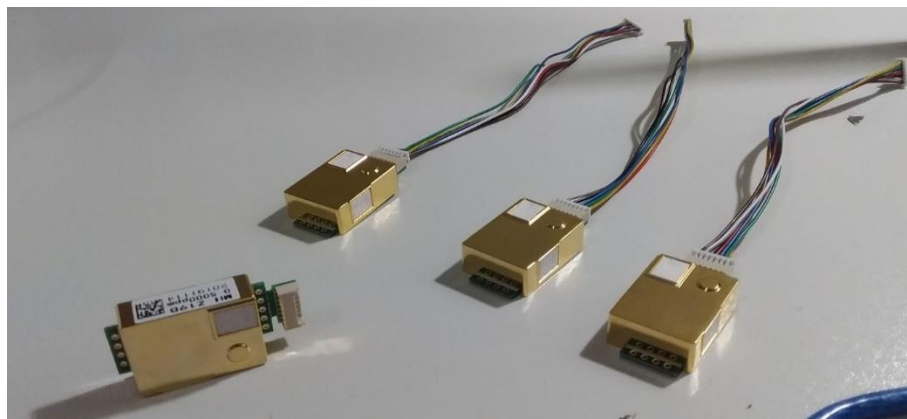
Quadro 16 – Especificações do sensor MH-Z19B

Parâmetro	Especificação
Tensão operacional	DC 5 ± 0,5 V
Corrente operacional	≤20 mA (DC 5 V)
Faixa de leitura	0 ~ 2000/5000 ppm
Saída do sinal	Porta serial / PWM
Tempo de pré-aquecimento	3 min
Tempo de resposta	T < 120 s
Temperatura de trabalho	-10 ~ 50 °C
Umidade de trabalho	0 ~ 95% RH (sem condensação)
Peso	5 g
Ciclo de vida	> 5 anos

Fonte: Datasheet do sensor MH-Z19B

Na **Figura 79** é apresentada a fotografia dos sensores físicos que foram utilizados no projeto UNIBIO.

Figura 79 – Fotografia dos sensores MH-Z19B



Fonte: Autor (2021)

3.6.3 G1/4-1.2Mpa – Sensor de Pressão

Para monitorar a pressão nas câmaras dos gasômetros, foi utilizado o sensor de pressão G1/4-1.2Mpa da fabricante ‘Seeed Studio Eletronic Products’. Na **Figura 80** é apresentado o sensor.

Figura 80 – Fotografia do sensor de pressão G1/4-1.2Mpa



Fonte: Datasheet do sensor de pressão G1/4-1.2Mpa (2017)

O G1/4-1.2Mpa é um sensor medidor de pressão, compacto, fácil de instalar, fortemente selado, com um sensor de efeito Hall de alta qualidade, além de possuir o selo RoHS. (Informações retiradas do datasheet do sensor¹⁵, 2017)

O sensor G1/4-1.2 MPa possui as especificações apresentadas no **Quadro 17**.

Quadro 17 – Especificações do sensor de pressão

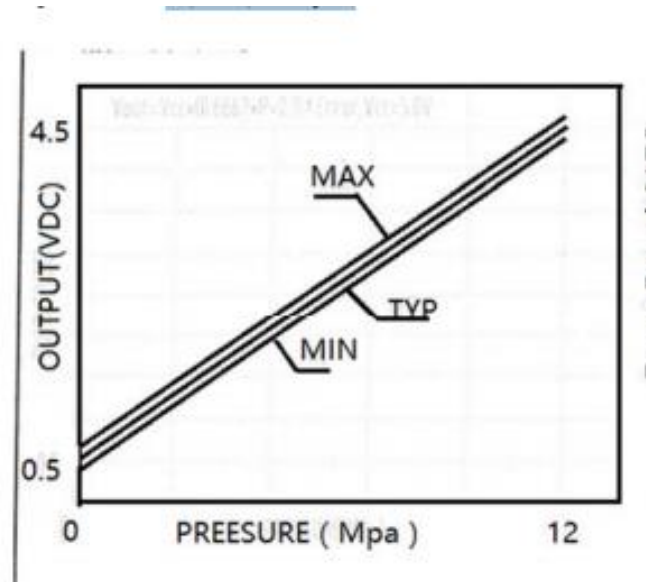
Parâmetro	Especificação
Tensão operacional	DC 5±0,5 V
Corrente operacional	≤10 mA (DC 5 V)
Tensão de saída	DC 0,5~4,5 V
Faixa de pressão	0~1,2 MPa
Pressão máxima	2,4 Mpa
Pressão destrutiva	3,0 Mpa
Faixa de temperatura	-20~+ 105 °C
Exatidão de medição	±1,5%FS
Tempo de resposta	≤2,0 ms
Vedação	IP65
Ciclo de vida	1.000.000 pcs

Fonte: Adaptado do datasheet do sensor de pressão (2017)

¹⁵ **Datasheet do sensor de pressão.** 2017. Disponível em: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Seeed%20Technology/114991178_Web.pdf Acesso em: 23 mar. 2021.

A tensão de saída do G1/4-1.2 MPa possui a propriedade apresentada na **Figura 81**. Como pode-se observar, o gráfico é uma função linear, então se torna fácil a implementação do microcontrolador, sendo necessário poucas linhas de código.

Figura 81 – Gráfico da saída do sensor de pressão



Fonte: Datasheet do sensor de pressão (2017)

Na **Figura 82** é apresentada a fotografia dos sensores utilizados no projeto UNIBIO.

Figura 82 – Fotografia dos sensores de pressão utilizados no projeto UNIBIO



Fonte: Autor (2021)

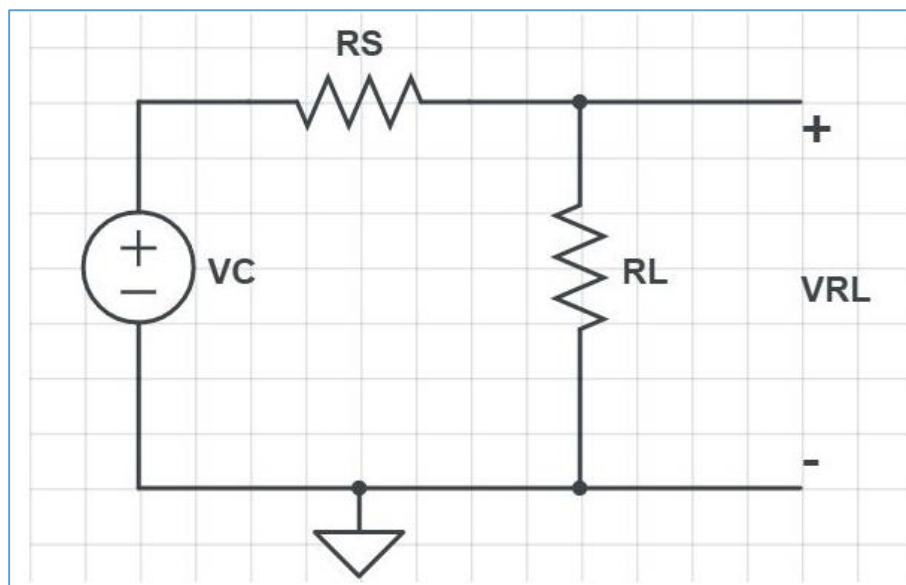
3.6.4 Calibração dos Sensores

3.6.4.1 Calibração do MQ-4 e MQ-136

Os sensores MQ-4 e MQ-136 possuem características e modo de operação semelhantes, diferenciando apenas na sensibilidade aos gases. A fabricante não define um método específico de cálculo de concentração de gás, mas fornece para os usuários dos sensores um gráfico que mostra a variação da resistência do sensor à medida que a concentração aumenta.

O gráfico de variação dos sensores está representado num gráfico na escala di-log, e a partir desse gráfico é encontrado a função matemática que será utilizado no microcontrolador para ler a concentração do gás desejado (CARRILLO-AMADO, CALIFA-URQUIZA E RÁMON-VALENCIA, 2020).

Figura 83 – Circuito de utilização dos sensores MQ



Fonte: Retirado do blog Jaycon Systems ¹⁶

O sensor deverá estar ligado conforme o circuito apresentado na **Figura 83**. O resistor RS se refere à resistência variável do sensor em determinada concentração de gás. A resistência RL se refere à uma resistência fixa que está em série com o sensor, que no caso é 1 kOhm. O microcontrolador irá obter a tensão que está identificada como VRL.

¹⁶ Disponível em: <https://jayconsystems.com/blog/understanding-a-gas-sensor> , Acesso em: 29 mar. 2021

A resistência de RS é o valor necessário para encontrar a concentração de gás no ambiente, mas o microcontrolador só tem acesso ao valor da tensão RL e conhece o valor da resistência de RL e da tensão VC, então a partir da Lei de Ohm, expressa na **Equação (4)**, é possível encontrar o valor de RS. Abaixo é demonstrado como encontrar a **Equação (5)**, que possibilita encontrar o valor de RS do sensor.

$$V = R * I \quad (4)$$

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = \frac{VC}{RS + RL}$$

$$VRL = I * (RS + RL)$$

$$VRL = \left[\frac{VC}{RS + RL} \right] * (RS + RL)$$

$$VRL = \frac{VC * RL}{RS + RL}$$

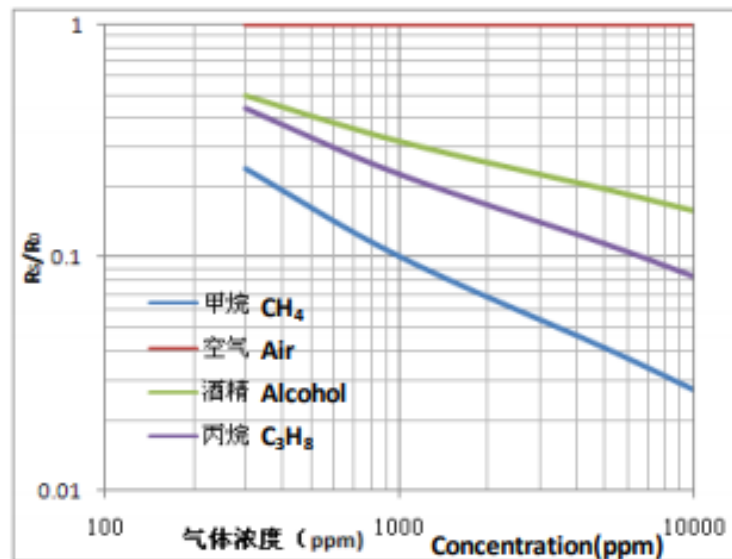
$$RS + RL = \frac{VC * RL}{VRL}$$

$$RS = \frac{VC * RL}{VRL} - RL \quad (5)$$

A **Equação (5)** encontrada pode ser utilizada para descobrir o valor de RS tanto para o MQ-4 quanto para o MQ-136. No projeto o valor de VC é 5 V e o de RL é 1 kOhm.

3.6.4.1.1 Calibração e Conversão (ppm) do MQ-4

Figura 84 – Gráfico de Variação de Valores do Sensor MQ-4



Fonte: Datasheet do MQ-4(2015)

Para encontrar o valor de concentração do gás metano no ambiente, é necessário encontrar a função da reta a partir do gráfico apresentado na **Figura 84**. O eixo das abcissas representa o valor de R_s/R_0 , onde R_s é a resistência do sensor em determinada concentração de gás, e o R_0 é uma constante que representa R_s ao ar livre (CARRILLO-AMADO, CALIFA-URQUIZA E RÁMON-VALENCIA, 2020).

Inicialmente deve-se encontrar o valor de R_0 , esse valor vai servir de calibração do sensor. Para encontrar R_0 , segundo o gráfico, basta encontrar R_s ao ar livre, pois a razão R_s/R_0 ao ar livre será 1 (conforme reta vermelha apresentada na **Figura 84**). Ou seja, R_0 será igual ao valor de R_s ao ar livre.

Os valores de R_0 encontrados para os sensores MQ-4 utilizados no projeto estão especificados na **Tabela 4**. Para realizar a calibração, os sensores foram ligados em uma protoboard, colocados em um ambiente ventilado e ficaram ligados durante 72 horas para fiquem devidamente aquecidos e com os valores estáveis. Após as 72 horas, para cada sensor, foi obtido o valor da tensão do resistor de carga VRL e então aplicado na **Equação (5)** para encontrar o valor de R_s ao ar livre, ou seja, o valor de R_0 .

Tabela 4 – Valores de Calibragem dos Sensores MQ-4 Utilizados no Projeto

MQ-4	Valor de R0 (Ohm)	Valor de VRL (V)
Biodigestor 1	9,46 k	0,48
Biodigestor 2	13,45 k	0,35
Biodigestor 3	9,46 k	0,48
Biodigestor 4	13,45 k	0,35

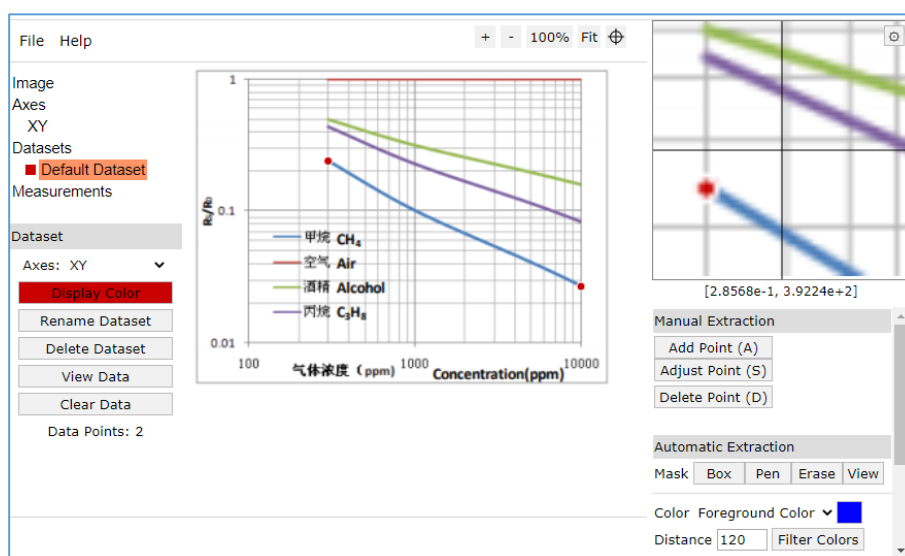
Fonte: Autor (2021)

Para utilizar o sensor é preciso encontrar a equação da reta do CH₄(reta azul na **Figura 84**). O gráfico está numa escala logarítmica por logarítmica, então será substituído y por log (y) e x por log (x). Na **Equação (6)** têm-se a equação reduzida para uma reta e na **Equação (7)** a equação reduzida de uma reta para a escala di-log.

$$y = mx + b \quad (6)$$

$$\log(y) = m * \log(x) + b \quad (7)$$

Para encontrar a função da reta é necessário obter 2 pontos da reta, e para isso foi utilizado um aplicativo chamado WebPlotterDigitalizer. Foram retirados do gráfico os pontos de coordenadas A (300, 0.24) e B (10000, 0.026). Na **Figura 85** é apresentada a utilização do aplicativo para retirar os pontos.

Figura 85 – Utilização do WebPlotterDigitalizer com Gráfico do Sensor Mq-4

Fonte: Autor (2021)

Depois de retirar os pontos do gráfico deve-se encontrar o coeficiente angular 'm' da reta conforme abaixo.

$$m = \frac{\log(y) - \log(y_0)}{\log(x) - \log(x_0)}$$

$$m = \frac{\log\left(\frac{y}{y_0}\right)}{\log\left(\frac{x}{x_0}\right)}$$

$$m = \frac{\log\left(\frac{0.026}{0.24}\right)}{\log\left(\frac{10000}{300}\right)}$$

$$m \cong -0,634 \quad (8)$$

Agora é preciso encontrar o valor da incógnita b que se refere ao ponto de interseção no eixo y conforme abaixo.

$$\log(y) = -0,634 * \log(x) + b$$

$$-b = -0,634 * \log(x) - \log(y)$$

$$b = \log(y) + 0,634 * \log(x)$$

$$b = \log(0,24) + 0,634 * \log(300)$$

$$b = 0,95 \quad (9)$$

Agora, a partir da junção da **Equação (7)** com a **Equação (8)** e a **Equação (9)**, é possível formar a equação da reta.

$$\log(y) = 0,95 - 0,634 * \log(x)$$

Como se quer encontrar a concentração do gás, deve-se deixar a equação em função de x.

$$\log(x) = \frac{\log(y) - 0,95}{-0,634}$$

$$x = 10^{\left[\frac{\log(y) - 0,95}{-0,634}\right]} \quad (10)$$

A incógnita 'y' na **Equação (10)** é definida como a razão R_S/R_0 , que para o projeto possui igualdade com a **Equação (11)** definida abaixo.

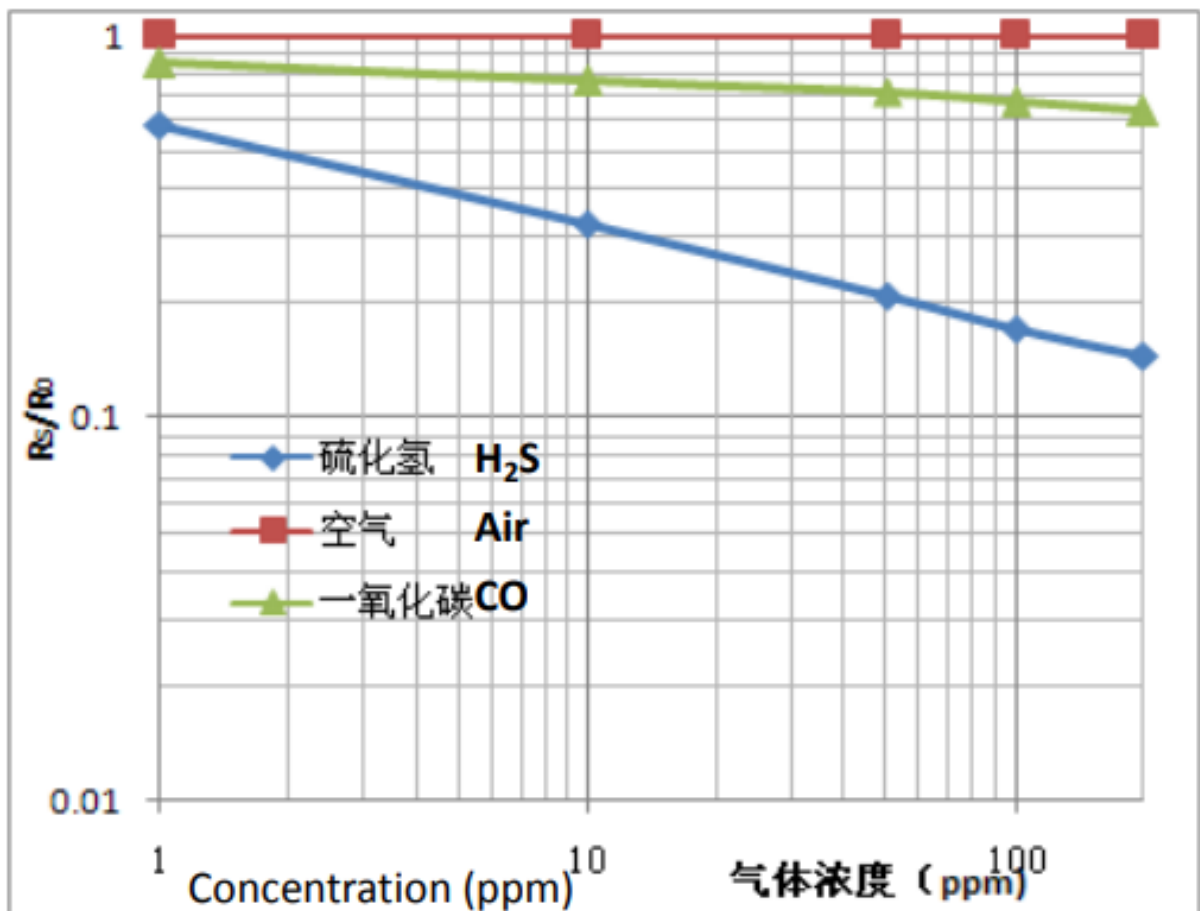
$$y = \frac{R_S}{R_0} = \frac{\frac{VC * RL}{VRL} - RL}{R_0}$$

$$y = \frac{\frac{5000}{VRL} - 1000}{R_0} \quad (11)$$

A partir da função na **Equação (10)** é possível encontrar o valor da concentração do gás metano no ambiente.

3.6.4.1.2 Calibração e Conversão (ppm) do MQ-136

Figura 86 – Gráfico de Variação de Valores do Sensor MQ-136



Fonte: Datasheet do Sensor MQ-136

Para encontrar o valor de concentração do gás sulfídrico no ambiente, é necessário encontrar a função da reta a partir do gráfico apresentado na **Figura 86**. O eixo das abcissas representa o valor de RS/R_0 , onde RS é a resistência do sensor em determinada concentração de gás, e o R_0 é uma constante que representa RS ao ar livre (CARRILLO-AMADO, CALIFA-URQUIZA E RÁMON-VALENCIA, 2020).

Inicialmente deve-se encontrar o valor de R_0 , esse valor vai servir de calibração do sensor. Para encontrar R_0 , segundo o gráfico, basta encontrar RS ao ar livre, pois a razão RS/R_0 ao ar livre será 1 (conforme reta vermelha na **Figura 86**). Ou seja, R_0 será igual ao valor de RS ao ar livre.

Os valores de R_0 encontrados para os sensores MQ-136 utilizados no projeto estão especificados na **Tabela 5**. Para realizar a calibragem, os sensores foram ligados em uma protoboard, colocados em um ambiente ventilado e ficaram ligados durante 72 horas para fiquem devidamente aquecidos e com os valores estáveis. Após as 72 horas, para cada sensor, foi obtido o valor da tensão do resistor de carga VRL e então aplicado na **Equação (5)** para encontrar o valor de RS ao ar livre, ou seja, o valor de R_0 .

Tabela 5 – Valores de Calibragem para o MQ-136

MQ-136	Valor de R_0 (Ohm)	Valor de VRL (V)
Biodigestor 1	45.5 k	0.1
Biodigestor 2	41.63 k	0.12
Biodigestor 3	38.35 k	0.13
Biodigestor 4	41.63 k	0.12

Fonte: Autor (2021)

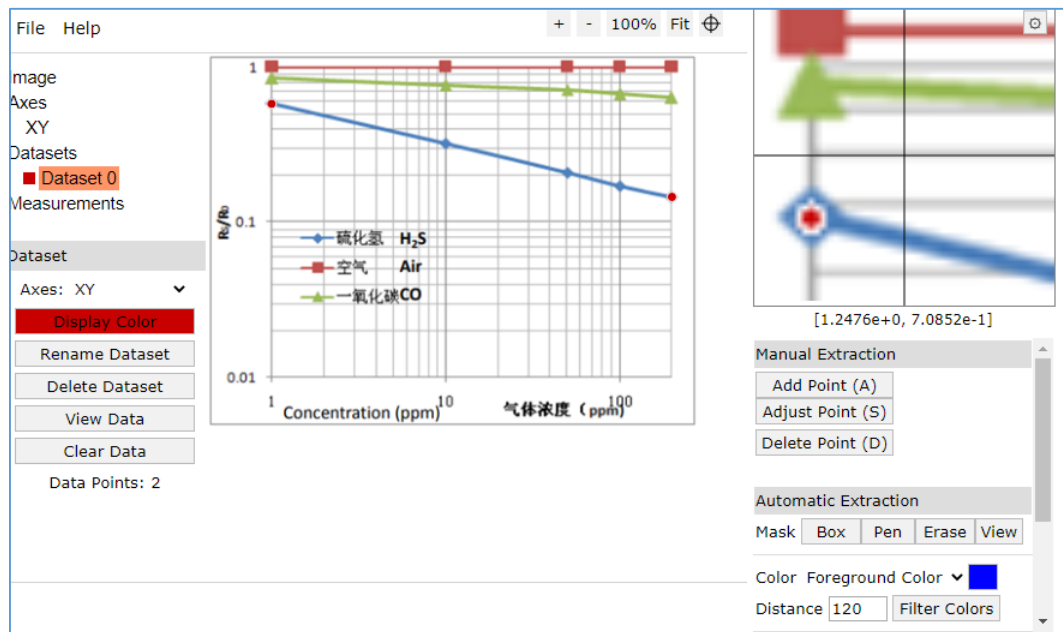
Para utilizar o sensor é preciso encontrar a equação da reta do H_2S (reta azul na **Figura 86**). O gráfico está numa escala logarítmica por logarítmica, então será substituído y por $\log(y)$ e x por $\log(x)$. Na **Equação (12)** têm-se a equação reduzida para uma reta e na **Equação (13)** a equação reduzida de uma reta para a escala di-log.

$$y = mx + b \quad (12)$$

$$\log(y) = m * \log(x) + b \quad (13)$$

Para encontrar a função da reta é necessário obter 2 pontos da reta, e para isso foi utilizado um aplicativo chamado WebPlotterDigitalizer. Foram retirados do gráfico os pontos de coordenadas A (1, 0.59) e B (200, 0.15). Na **Figura 87** é apresentada a utilização do aplicativo para retirar os pontos.

Figura 87 – Utilização do WebPlotterDigitalizer com Gráfico do Sensor MQ-136



Fonte: Autor (2021)

Depois de retirar os pontos do gráfico deve-se encontrar o coeficiente angular 'm' da reta conforme abaixo.

$$m = \frac{\log(y) - \log(y_0)}{\log(x) - \log(x_0)}$$

$$m = \frac{\log\left(\frac{y}{y_0}\right)}{\log\left(\frac{x}{x_0}\right)}$$

$$m = \frac{\log\left(\frac{0.15}{0.59}\right)}{\log\left(\frac{200}{1}\right)}$$

$$m \cong -0,258$$

(14)

Agora é preciso encontrar o ponto de interseção b no eixo y conforme abaixo.

$$\begin{aligned}
 \log(y) &= -0.258 * \log(x) + b \\
 -b &= -0.258 * \log(x) - \log(y) \\
 b &= \log(y) + 0,258 * \log(x) \\
 b &= \log(0.15) + 0,258 * \log(200) \\
 b &= -0.23 \quad (15)
 \end{aligned}$$

Agora, a partir da junção da **Equação (7)** com a **Equação (14)** e **Equação (15)**, é possível formar a equação da reta.

$$\log(y) = -0,23 - 0,258 * \log(x)$$

Como queremos encontrar a concentração do gás, devemos deixar a equação em função de x .

$$\begin{aligned}
 \log(x) &= \frac{\log(y) + 0.23}{-0.258} \\
 x &= 10^{\left[\frac{\log(y) + 0.23}{-0.258} \right]} \quad (16)
 \end{aligned}$$

A incógnita y na **Equação (16)** é definida como a razão $RS/R0$, que para o projeto é igual a **Equação (17)** definida abaixo.

$$\begin{aligned}
 y = \frac{RS}{R0} &= \frac{\frac{VC * RL}{VRL} - RL}{R0} \\
 y &= \frac{\frac{5000}{VRL} - 1000}{R0} \quad (17)
 \end{aligned}$$

A partir da função na **Equação (16)** é possível encontrar o valor da concentração do gás sulfídrico no ambiente.

3.6.4.2 Calibração do MH-Z19B

O MH-Z19B oferece a opção de se autocalibrar ou ser calibrado manualmente, no projeto foi feita manualmente. A calibração se faz pela interface serial, em um comando próprio de calibragem. No projeto os 4 sensores utilizados foram encaixados em uma protoboard, conectados com um Arduino, colocados em um ambiente ventilado e ficaram ligados durante 1 hora para que fiquem devidamente aquecidos e com os valores estáveis, após isso foi enviado um comando para reiniciar os valores em 400 ppm, tendo em vista que essa é a quantidade aproximada de gás carbônico ao ar livre (FAYOS-JORDAN, 2021).

A **Figura 88** apresenta o comando que foi enviado pela interface serial para cada um dos sensores.

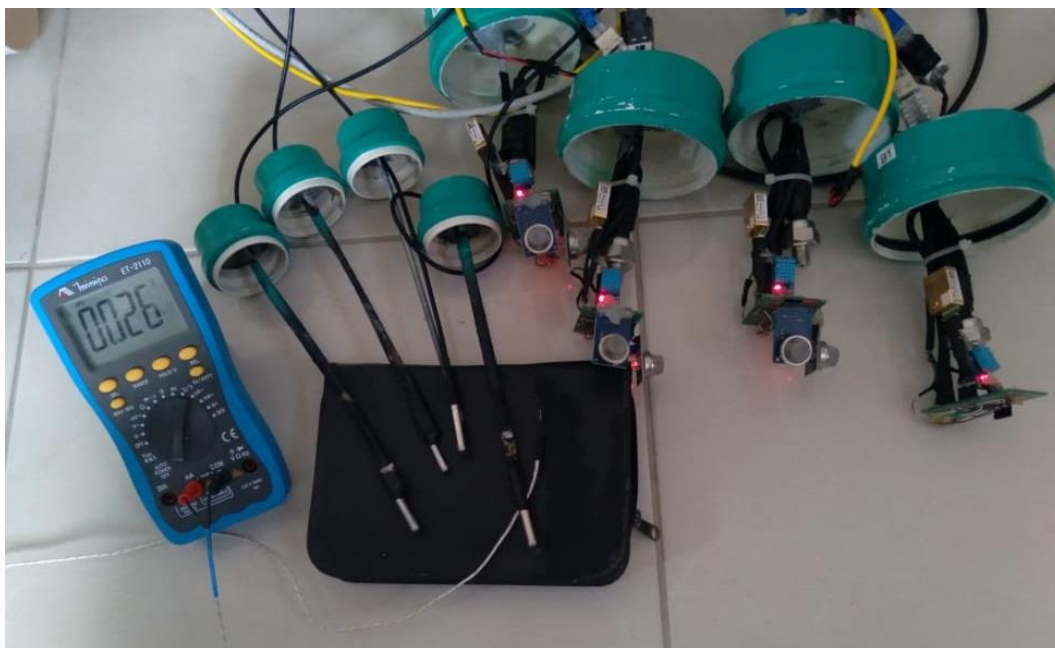
Figura 88 – Comando de Calibragem do MH-Z19B

0x87-ZERO POINT CALIBRATION								
Request								
Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8
Start Byte	Sensor #	Command	-	-	-	-	-	Checksum
0xFF	0x01	0x87	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	校验和
NO RESPONSE								
NOTE: ZERO POINT is 400PPM, PLS MAKE SURE THE SENSOR HAD BEEN WORKED UNDER 400PPM FOR OVER 20MINUTES								

Fonte: Datasheet do sensor MH-Z19B (2016)

3.6.4.3 Calibração do DHT11 e DS18B20

Para calibração dos sensores de temperatura os sensores foram comparados as leituras em climas diferenciados. Nesta calibração foram utilizados os 4 sensores DHT11 que mede a temperatura do gasômetro e os 4 sensores DS18B20 que mede a temperatura da câmara de biomassa do biodigestor. A leitura de temperatura utilizada como referencial para calibração foi a obtida no multímetro profissional ET-2110 que foi submetido as mesmas condições de clima durante as leituras para calibragem. A calibração foi apresentada na **Figura 89**.

Figura 89 – Calibração dos sensores de temperatura e umidade

Fonte: Autor (2021)

A **Tabela 6** apresenta os valores das leituras de temperatura realizadas nos sensores e no equipamento de referência. A coluna “Ajuste” é o valor que será aplicado em cada sensor para uniformização de calibragem dos valores encontrados nos sensores de temperatura. O local do teste foi em ambiente climatizado para propiciar diferentes situações de temperaturas (baixa, média, alta). A variação encontrada nos componentes foi inferior a dois por cento (< 2%).

Tabela 6 – Dados de calibração dos sensores de temperatura

Equipamento	Leitura dos Sensores			Ajuste	Leitura Ajustada		
	Baixa (°C)	Média (°C)	Alta (°C)		Baixa (°C)	Média (°C)	Alta (°C)
ET2110(REF)	20	26	32	REF	20	26	32
DHT11_1	20,4	26,4	32,3	-0,4	20	26	31,9
DHT11_2	20,2	26,2	32,1	-0,2	20	26	31,9
DHT11_3	20,5	26,5	32,4	-0,5	20	26	31,9
DHT11_4	19,8	25,9	32	0,1	19,9	26	32,1
DS18B_1	20,1	26,1	32	-0,1	20	26	31,9
DS18B_2	20,1	26	32	0	20,1	26	32
DS18B_3	20,2	26,2	32,2	-0,2	20	26	32
DS18B_4	20	25,9	31,9	0,1	20,1	26	32

Fonte: Autor (2021)

A **Tabela 7** apresenta os valores das leituras de umidade realizadas nos sensores e no equipamento de referência. Na calibração dos sensores de umidade relativa do ar foi utilizado um método semelhante ao utilizado na calibração de temperatura, diferindo em dois aspectos, o primeiro é que o equipamento de referência das leituras de umidade relativa do ar ambiente foi o Higrômetro HR202L que foi comparado as leituras dos quatro sensores de umidade DHT11. O segundo aspecto foi o ambiente que foi selecionado em períodos variados do dia (manhã, tarde ou noite) onde houve maior variação da umidade relativa do ambiente. A variação encontrada nos componentes foi inferior a dois por cento (< 2%).

Tabela 7 – Dados de calibração dos sensores de umidade

Equipamento	Leitura dos Sensores			Ajuste	Leitura Ajustada		
	Baixa (%)	Média (%)	Alta (%)		Baixa (%)	Média (%)	Alta (%)
HR202L (REF)	50	70	90	REF	50	70	90
DHT11_1	50	70	90	0	50	70	90
DHT11_2	52	71	91	-1	51	70	90
DHT11_3	51	71	91	-1	50	70	90
DHT11_4	49	69	90	1	50	70	91

Fonte: Autor (2021)

3.6.4.4 Calibração do sensor de pressão

Para a calibração e aferição dos sensores de pressão (G1/4-1.2 MPa). Os módulos sensores do biodigestor foram montados em um acoplador de forma que todos os sensores de pressão estivessem em uma única câmara de ar e pressurizados com um mini compressor de ar com manômetro com escala de pressão em PSI. Foram pressurizadas as seguintes escalas manométricas na câmara de ar do calibrador (1 psi, 2 psi e 5 psi) e feita a leitura dos valores capturados pelos sensores de pressão.

O teste limitou-se a pressão de 5 psi, por questões de segurança, pois neste nível a pressão equivale a 3.515 k.gf/m² uma pressão relativamente alta e atinge um nível suficiente de pressão para a pressão gerada no processo de biodigestão e como o gráfico de curva do sensor de pressão comporta-se de forma linear, os pontos aferidos se mostram adequados para a calibração desses sensores.

A **Figura 90** apresenta o equipamento adaptado para a calibração dos sensores de pressão em operação.

Figura 90 – Equipamento adaptado para a calibração dos sensores de pressão



Fonte: Autor (2021)

Para esta calibração os sensores de pressão de finalidade industrial, apresentaram leituras lineares e os quatro componentes avaliados não tiveram margem de ajuste na leitura para a escala testada em libra-força por polegada quadrada (psi) para o intervalo de 0 a 5 unidades de medida.

A **Tabela 8** apresenta os valores de leituras e os valores de calibração dos sensores de pressão.

Tabela 8 – Dados de calibração dos sensores de pressão

Equipamento	Leitura dos Sensores			Ajuste	Leitura Ajustada		
	Baixa (psi)	Média (psi)	Alta (psi)		Baixa (psi)	Média (psi)	Alta (psi)
Manômetro	1	2	5	REF	1	2	5
G1/4-1.2_1	1	2	5	0	1	2	5
G1/4-1.2_2	1	2	5	0	1	2	5
G1/4-1.2_3	1	2	5	0	1	2	5
G1/4-1.2_4	1	2	5	0	1	2	5

Fonte: Autor (2021)

3.6.4.5 Calibrador de Conjunto

O dispositivo calibrador de conjunto foi criado com o objetivo de fazer uma aferição da calibragem do conjunto de módulos sensores de gases dos biodigestores UNIBIO, no qual os 4 módulos sensorizados são ativados no sistema e estarão submetidos a uma mesma exposição de biogás e condições de temperatura, umidade e pressão. O sistema é inicializado e os dados são coletados enviados via controlador IoT para um banco de dados na internet.

Em suma é uma simulação do funcionamento do sistema real, porém com os módulos sensores em um mesmo ambiente de leitura e exposto ao biogás em plena geração. Tem como objetivo também validar se todos os sensores dos gases (metano, sulfídrico e carbônico) e suas calibrações estão em conformidade para utilização dos módulos sensores em ambientes distintos e que esses dados possam ser comparados. Na **Figura 91** é apresentada a fotografia do modulo calibrador de conjunto em funcionamento.

Figura 91 – Fotografia do calibrador de conjunto em funcionamento



Fonte: Autor (2021)

Para verificação em tempo real dos dados coletados pelos sensores. Foi desenvolvido um aplicativo para monitoramento das leituras que estavam sendo realizadas pelos módulos sensores em uso no calibrador. A **Figura 92** apresenta a tela do aplicativo utilizado no equipamento calibrador de conjunto.

Figura 92 – Tela do aplicativo para calibragem dos sensores



Fonte: Autor (2021)

Percebe-se que os valores de leitura de temperatura e umidade apresentam uma variação de valores para os módulos da extremidade (1 e 4) em relação aos módulos centrais (2 e 3). Essa diferença se dá, pois, o posicionamento dos sensores de umidade e temperatura ficam na parte superior do módulo, sendo que no calibrador de conjunto os módulos centrais ficam posicionados em um nível mais elevado que os módulos das extremidades.

Como o objetivo de criação do calibrador de conjunto os sensores a serem aferidos eram os sensores concentração de gases, esses sensores nos módulos (1, 2, 3 e 4) estão bem próximos fisicamente e em um mesmo nível de altitude dentro da câmara de gás do calibrador de conjunto. Para os sensores de umidade e temperatura do gasômetro na sua montagem no biodigestor específico essa diferença não existirá, pois, todos os módulos estarão montados na mesma posição em todos os biodigestores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Protótipos de Biodigestores Batelada

Foi realizada a adequação e melhoria do modelo de biodigestor batelada utilizado por Santos (2018) em ensaios de biodigestão anteriores. É apresentado na **Figura 93** o modelo original do biodigestor batelada e na **Figura 94** o modelo construído que foi utilizado no ensaio de digestão anaeróbia desta pesquisa.

Figura 93 – Modelo de referência do biodigestor utilizado por Santos (2018)



Fonte: Santos (2018)

Figura 94 – Resultado do biodigestor adaptado produzido para o projeto



Fonte: Autor (2021)

Como resultados os biodigestores de bancada desenvolvidos desempenharam as características previstas para o qual foram modelados, durante os ensaios de biodigestão anaeróbia, tendo como características positivas a destacar:

- Fácil alimentação da biomassa e carga dos filtros no início do processo;
- Fácil desmontagem após o final de cada ciclo sendo pratica a descarga do substrato de resíduo após o processo de digestão;
- Fácil lavagem do biodigestor para preparar o dispositivo para o reinício de ciclo.
- Fácil substituição dos filtros com o equipamento em funcionamento
- Integração ao sistema de sensoriamento eletrônico UNIBIO
- Melhor vedação e retenção de odores expelidos pelo equipamento e uso
- Melhoria na resistência mecânica do equipamento biodigestor evitando o aparecimento de trincas e vazamentos de biogás

De ponto negativo relata-se que com o aumento da pressão na câmara do gasômetro, ao se ultrapassar a medição de 4 kPa, a junção do tubo PVC do acoplamento do modulo de sensores ao material do garrafão que é de policarbonato, houve rompimento do adesivo selante a base de PU, ocasionando vazamento de gases, problema este que foi resolvido com a adição de resina epóxi de alta dureza. O que se recomenda a substituição do adesivo PU por resina epóxi para esta junção nas próximas construções.

4.2 Hardware de Monitoramento

Foi realizada a construção dos módulos de sensores para biodigestor e o módulo controlador IoT que permitiu a comunicação em tempo real dos biodigestores monitorados com a internet através da plataforma IoT.

Os componentes de hardware como o controlador IoT e o modulo de sensores para biodigestor tiveram seu funcionamento plenamente em conformidade com os quesitos para quais foram definidos tendo os seguintes resultados destacados:

- O funcionamento do sistema de forma ininterrupta durante todo o período da biodigestão, tendo seu sistema de controle de falhas adversas obtido sucesso na preservação de dados no caso de salvamento de contingência em cartão de memória local em falhas esporádicas dos canais de comunicação com a

nuvem, tendo os dados sendo reestabelecidos integralmente ao se reestabelecer os canais de comunicação mantendo assim a integridade dos dados coletados pelos sensores.

- Os módulos sensores para biodigestor obtiveram fácil acoplamento com o dispositivo de biodigestão e prático acesso para manutenção.

Como ponto negativo, porém conforme já estava previsto, destaca-se que o protótipo referencial sem filtros (Biodigestor 1), apresentou alto nível de oxidação e corrosão dos componentes eletrônicos do módulo de sensores devido a exposição direta a gases altamente corrosivos como o ácido sulfídrico (H_2S) o que diminui consideravelmente a vida útil dos componentes eletrônicos. Para contingenciar esse ponto negativo recomenda-se sempre o uso de filtros para os gases corrosivos presentes no biogás.

4.3 Softwares de Monitoramento

Os módulos de sistemas de softwares desenvolvidos para o sistema UNIBIO apresentaram o desempenho e a performance esperados para os objetivos que se propunham. Seguem os resultados alcançados com módulos de Software:

I – O módulo de software embarcado do controlador IoT apresentou estabilidade e confiabilidade, não tendo havido ocorrências de lentidão ou travamentos durante todo o processo do ciclo de biodigestão. Esse módulo foi um dos responsáveis pela geração dos dados de biodigestão coletados durante o primeiro e segundo ensaio da digestão anaeróbia desta pesquisa. Por se tratar de um software embarcado instalado no hardware do controlador IoT esse módulo não possui interface gráfica ou visual.

II – O módulo de software de servidor WEB que está integrado ao banco de dados também apresentou o desempenho satisfatório, tendo apresentado sempre alta disponibilidade e responsividade durante todo o ciclo da biodigestão. Fornecendo acesso aos dados de forma controlada ao módulo de sistema WEB cliente. Na **Figura 95** é apresentada a tela de interface shell do módulo sistema servidor WEB em funcionamento. Por se tratar de um módulo de sistema back-end de servidor esse módulo não possui interface GUI (interface gráfica do utilizador).

Figura 96 – Tela inicial de Login

UNIBIO

Entrar no Sistema

Usuário

Senha

☐ Remember me

Entrar

© UNIBIO

Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 97** é mostrada a tela principal do módulo cliente WEB do sistema UNIBIO, no qual vemos a relação de projetos de biodigestores cadastrados no sistema e que podem ser acessados com um simples clique em cima do nome do projeto.

Figura 97 – Tela de relação de projetos

UNIBIO						
Projetos						
Cadastrar Novo						
Nome	Proprietário	Resp. Técnico	Biodigestor	Biomassa	Cidade	
UNIBIO Biodigestor 01	Unilab - Universidade da Integração Internacional	Francisco Paulo Henrique de Andrade	Batelada	Esterco Bovino	Fortaleza/Ceará	desativado monitorado
UNIBIO Biodigestor 02	Unilab - Universidade da Integração Internacional	Francisco Paulo Henrique de Andrade	Batelada	Esterco Bovino	Fortaleza/Ceará	desativado monitorado
UNIBIO Biodigestor 03	Unilab - Universidade da Integração Internacional	Deyk Anne Calixto	Batelada	Esterco Bovino	Fortaleza/Ceará	desativado monitorado
UNIBIO Biodigestor 04	Unilab - Universidade da Integração Internacional	Deyk Anne Calixto	Batelada	Esterco Bovino	Fortaleza/Ceará	desativado monitorado
Comunidade Uruá	Comunidade Uruá	Maria Luciene da Silva	Indiano	Esterco Suíno	Barreira/Ceará	ativo
Fazenda de Suínos Antônio Diogo	Fazenda de Suínos Antônio Diogo	Fazenda de Suínos Antônio Diogo	Canadense	Esterco Suíno	Redenção/Ceará	ativo
Assentamento Denir	COPASAT - Cooperativa de Trabalho Prestadora de Serviços	ATER - Assistência Técnica e Extensão Rural	Indiano	Esterco Bovino	Ocara/Ceará	ativo
Biodigestor Urbano	Francisco Paulo Henrique de Andrade	Francisco Paulo Henrique de andrade	Batelada	Esterco Bovino	Fortaleza/Ceará	ativo monitorado

Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 98** é mostrada a tela para cadastramento de um novo projeto de um biodigestor com informações técnicas sobre o equipamento de digestão anaeróbia, assim como o status de funcionamento do digestor anaeróbio e se o mesmo é monitorado por sensores online do sistema UNIBIO.

Figura 98 – Tela de Cadastro de Projeto

Cadastrar Biodigestor

Projeto
Nome do Projeto*

Tipo de Biodigestor: Volume do Biodigestor:

Tipo de Biomassa:

Filtros:

Data de Início: Data de Fim:

☒ Biodigestor Ativo
☒ Biodigestor Monitorado

Imagem do Projeto: Nenhum arquivo selecionado

Localização
Latitude: Longitude: Altitude:

Endereço:

Cidade: Estado: País:

Proprietário
Nome:

Telefone: Email:

Responsável Técnico
Nome:

Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 99** e **Figura 100** são mostradas as telas de edição e de exclusão de dados de um projeto de biodigestor cadastrado no sistema. Esses níveis de acesso são permitidos apenas a usuários autorizados no sistema com perfil de edição ou com perfil administrador para o caso de exclusão de um projeto cadastrado.

Figura 99 – Tela de editar projeto

UNIBIO

Editar Biodigestor

Projeto

Nome do Projeto:

Tipo do Biodigestor: Volume do Biodigestor: Litros

Tipo de Alimentação:

Líquido:

Data de Início: Data de Fim:

☒ Biodigestor Ativo ☐ Biodigestor Não Monitorado

Imagem do Projeto: Nenhum arquivo selecionado

Localização

Latitude: Longitude: Altitude:

Inscreva-se

Fonte: Autor (2021)

Figura 100 – Aviso de remoção de projeto

Tem certeza?

Tem certeza que deseja remover o projeto? (Não recomendado)

Isso irá excluir todos os dados de leituras dos sensores se o Biodigestor for monitorado !!!

remover **Cancelar**

Fonte: Autor (2021)

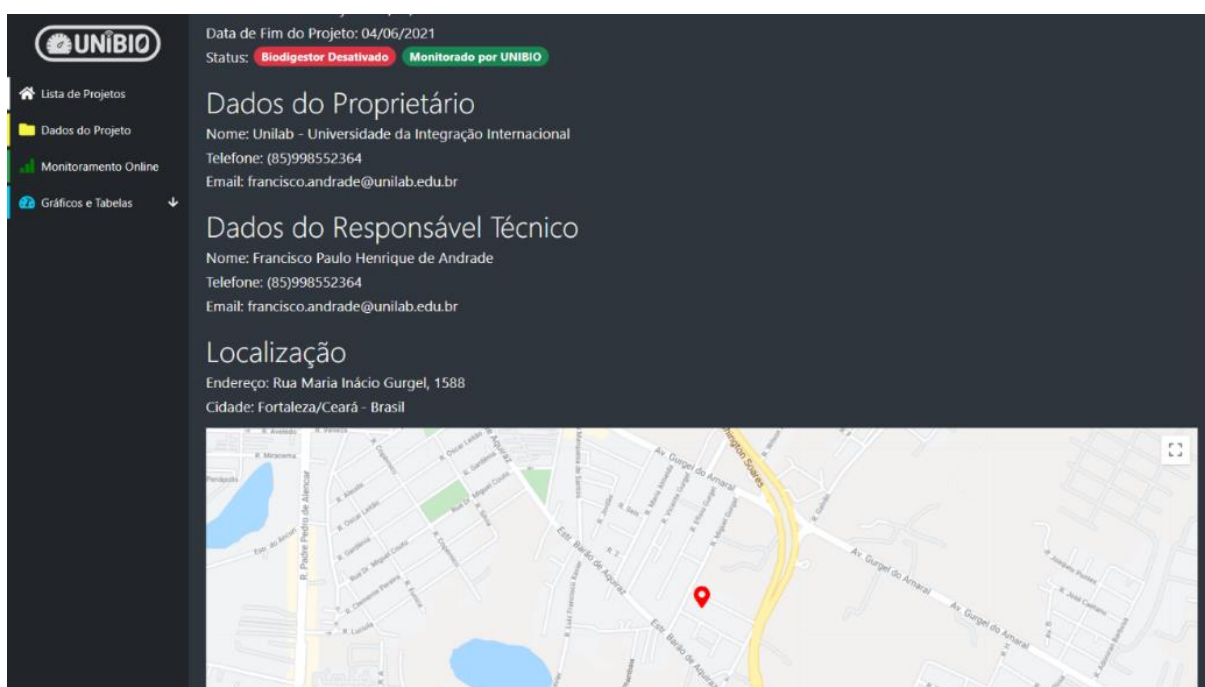
Na **Figura 101** e **Figura 102** são mostradas as imagens das telas que mostram os dados detalhados de um projeto cadastrado com as seguintes informações: Fotografia do biodigestor que pode ser inserida pelo utilizador, especificação de parâmetros técnicos do projeto como dados de biomassa, dados de filtros, capacidade do equipamento, endereço e mapa visual com localização geográfica do projeto.

Figura 101 – Tela de dados do projeto



Fonte: Autor (2021)

Figura 102 – Tela de dados do projeto, continuação

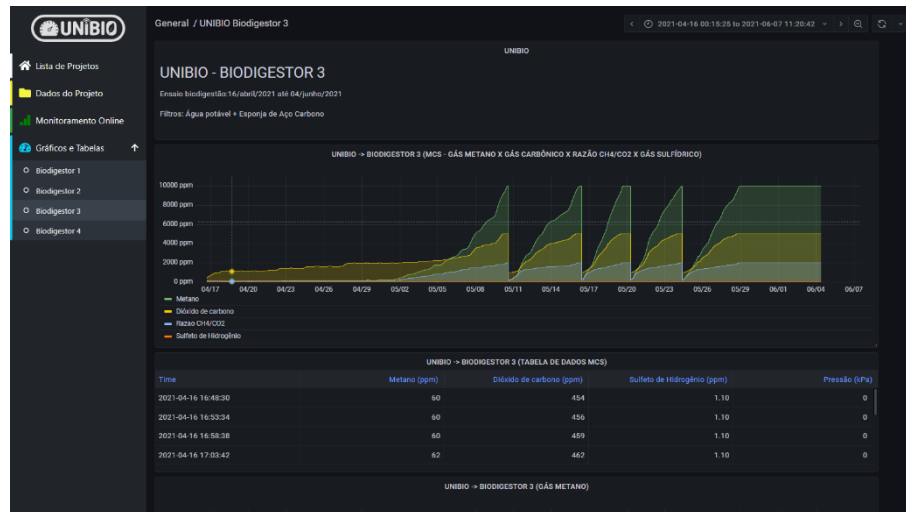


Fonte: Autor (2021)

Na sequência vemos as principais telas de gráficos gerados pelo sistema UNIBIO a partir dos dados coletados e armazenados pelo modulo de monitoramento remoto.

Na **Figura 103** é mostrado o gráfico cartesiano de vários gases lidos como: gás metano, gás carbônico e gás sulfídrico ao longo da linha temporal ocorrida durante o processo de digestão anaeróbia, seguida pela tabela de dados desses gases.

Figura 103 – Gráfico cartesiano de vários gases



Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 104** é mostrado os gráficos de (gases x tempo) apresentados de forma individualizada por tipo de gás.

Figura 104 – Gráficos de Gases x Tempo



Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 105** é mostrado o gráfico cartesiano representado ao longo do tempo de parâmetros como variações de temperaturas (gasômetro, biomassa e ambiente), variação da umidade relativa do ar e pressão manométrica interna da câmara de biogás.

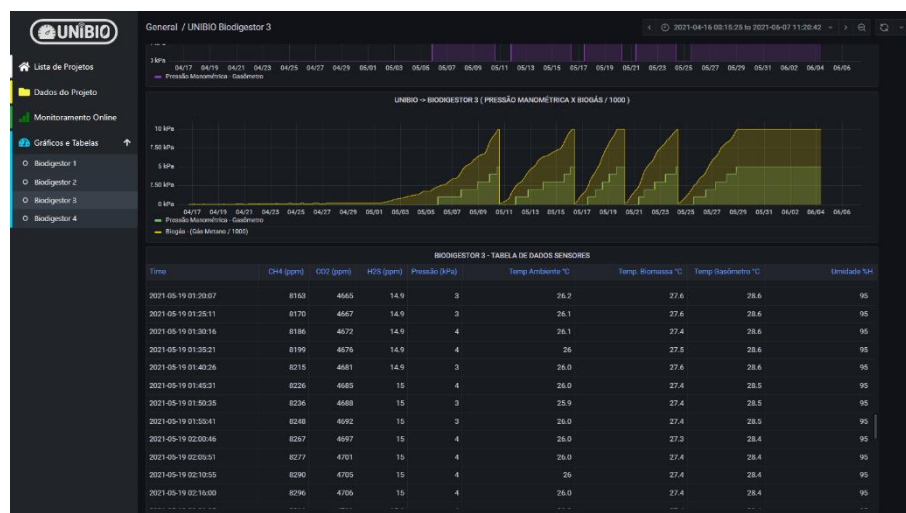
Figura 105 –Gráfico cartesiano de temperatura x umidade x pressão



Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 106** é apresentada a projeção do gráfico mostrando de forma comparativa e evolução da concentração de gás metano e a variação de pressão manométrica no gasômetro seguida logo abaixo com a tabela completa seriada com todos os parâmetros lidos no biodigestor.

Figura 106 – Gráfico de evolução comparativa do gás metano



Fonte: Autor (2021)

Na **Figura 107** é apresentada a tela chamada de monitoramento online com os dados coletados em tempo real para biodigestores em funcionamento e que sejam monitorados pelo sistema UNIBIO.

Figura 107 – Tela de monitoramento do Biodigestor



Fonte: Autor (2021)

4.4 Biodigestão Anaeróbia

O primeiro ciclo de biodigestão foi realizado com sucesso, o objetivo deste ciclo teve como finalidade realizar a aferição e os ajustes necessários no sistema de sensoramento eletrônico. O segundo ciclo de biodigestão ocorreu também em conformidade com o processo proposto e teve como objetivo validar o primeiro ensaio assim como gerar dados para análises do processo de biodigestão e o desempenho dos filtros para o biogás gerado. A partir desses dados coletados pelo sistema UNIBIO é que foram feitas as análises sobre o desempenho dos filtros de biogás aplicados.

A **Tabela 9** apresenta os seguintes resultados consolidados a partir do base de dados:

Tabela 9 – Relatório Consolidado de Leituras Biodigestor UNIBIO

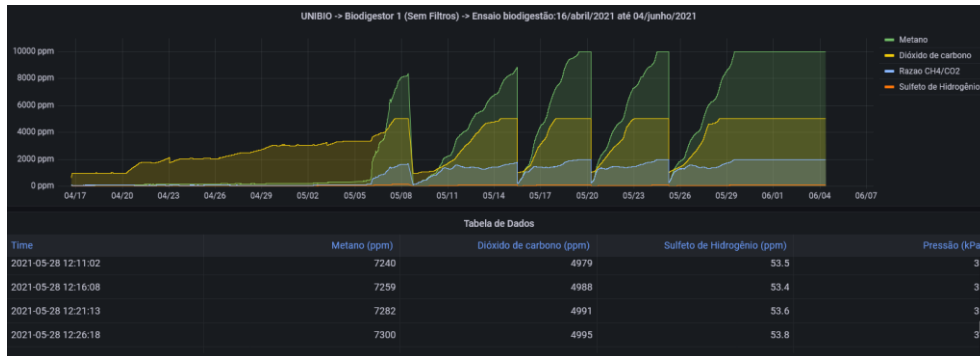
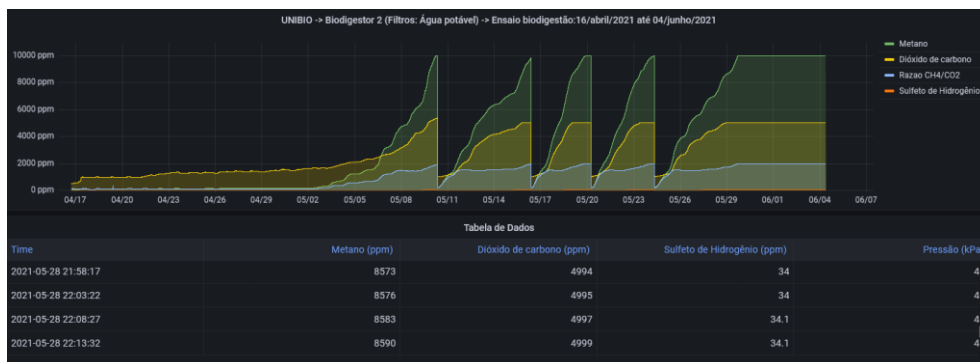
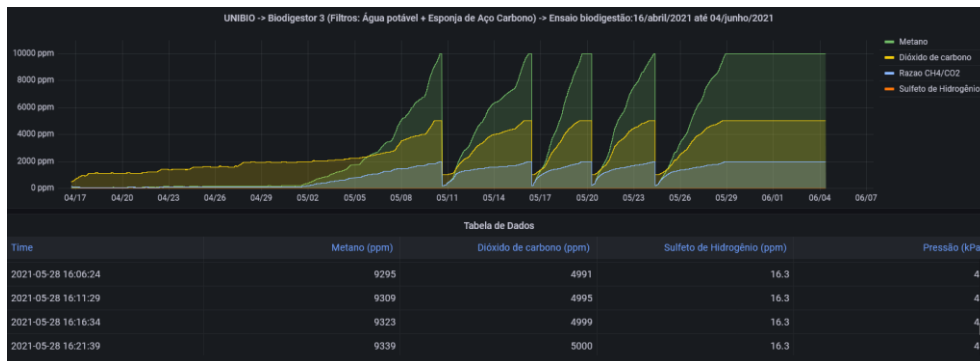
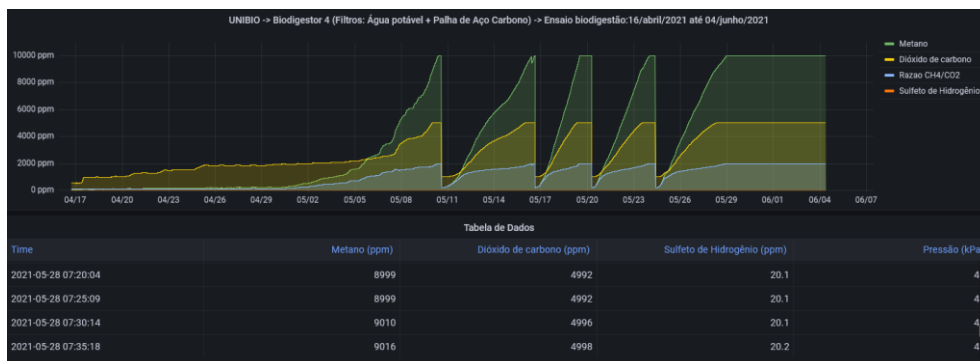
Escopo Avaliado: Variação Climática e Concentração de Gases																
Período Avaliado																
1º Ensaio de Digestão Anaeróbia: 20/07/2020 até 10/08/2020																
2º Ensaio de Digestão Anaeróbia: 16/04/2021 até 04/06/2021																
	Biodigestor 1 Sem Filtros				Biodigestor 2 Filtro: Água				Biodigestor 3 Filtros: Água + Esponjas de Aço				Biodigestor 4 Filtros: Água + Palhas de Aço			
	1º Ensaio		2º Ensaio		1º Ensaio		2º Ensaio		1º Ensaio		2º Ensaio		1º Ensaio		2º Ensaio	
Temperatura Máxima																
Biomassa	29,7°C		30,8°C		32,2°C		31,5°C		32,6°C		32,3°C		32,8°C		31,3°C	
Temperatura Mínima																
Biomassa	26,1°C		23,1°C		25,6°C		23,5°C		25,1°C		23,8°C		24,9°C		23,6°C	
Temperatura Máxima Gasômetro	39,8°C		47°C		38,5°C		44,9°C		38,2°C		43,4°C		39,1°C		42,3°C	
Temperatura Mínima Gasômetro	24,1°C		25,5°C		23,8°C		25,9°C		23,7°C		26°C		24,1°C		24,3°C	
Umidade Máxima Gasômetro	92%		89%		95%		95%		95%		95%		95%		95%	
Umidade Mínima Gasômetro	68%		50%		78%		83%		79%		81%		76%		88%	
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%
Gás CH ₄	7350	61,5	7251	60,7	8920	65,9	8576	64,9	9550	67,4	9278	66,7	9385	67,1	8998	66,1
Gás CO ₂	4600	38,4	4600	38,5	4600	34	4600	34,8	4600	32,5	4600	33,1	4600	32,8	4600	33,8
Gás H ₂ S	67	<1	88	<1	24	<1	31	<1	8	<1	16	<1	12	<1	18	>1
	1º Ensaio								2º Ensaio							
Máximo de Temperatura Ambiente:	32,2°C				(Horário Pico: 13:20h 01/08/2020)				45,4°C				(Horário Pico: 10:28h 27/04/2021)			
Mínimo de Temperatura Ambiente:	20,8°C				(Horário Pico: 05:45h 06/08/2020)				21,8°C				(Horário Pico: 06:39h 03/05/2021)			
Considerações Observadas:																
1) A aplicação de Filtros gera uma barreira térmica que retêm maior calor na biomassa durante períodos de exposição ao sol;																
2) A aplicação da camada de filtro líquido com água eleva bastante a umidade relativa do ar dispersa no gasômetro;																
3) O filtro que se mostrou mais eficiente no período do experimento foi a combinação utilizada no biodigestor 3: Água + Esponja de Aço.																
Obtendo-se Gás Metano na Proporção de 66,7% com a presença de Sulfeto de Hidrogênio na concentração de 16 ppm.																
O resultado padrão de referência sem filtros apresentou gás Metano na proporção de 60,7% com a presença de Sulfeto de Hidrogênio em concentração de 88 ppm (Considerado Valores do 2º Ensaio de digestão anaeróbia);																

Fonte: Autor (2021)

4.5 Desempenho dos Filtros e Análise de Dados

A partir da base de dados gerada pelo monitoramento eletrônico no ensaio de biodigestão ocorrido no período entre os dias: 12 de abril de 2021 e o dia 04 de junho de 2021 coletados pelo sistema UNIBIO, o módulo cliente WEB nos apresentou através de gráficos e tabelas de dados os resultados para cada protótipo de biodigestor.

Os resultados do desempenho dos filtros foram extraídos a partir da análise dos dados gerados pelo sistema de monitoramento, conforme os gráficos apresentados na **Figura 108** que abrangia os seguintes dados de leituras dos gases em ppm (gás metano, dióxido de carbono, razão metano/dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio)

Figura 108 – Gráficos de Dados dos Biodigestores**Gráficos de Dados: Biodigestor 1 – MCS****Gráfico de Dados: BIODIGESTOR 2 – MCS****Gráfico de Dados: BIODIGESTOR 3 – MCS****Gráfico de Dados: BIODIGESTOR 4 – MCS**

Fonte: Autor (2021)

Inferiu-se ainda, a partir dos dados expostos na **Figura 108**, as informações que foram dispostas conforme as tabelas a seguir.

Para o protótipo do biodigestor 1, conforme a **Tabela 10** abaixo:

Tabela 10 – Dados coletados no sistema UNIBIO para o Biodigestor 1

Filtro Sólido: Nenhum / Filtro Líquido: Nenhum

Ciclos	Tempo Saturação (Dias)	Leitura CO ₂ (5000 ppm) Data / Hora	Pressão Gás (kPa)	Gás CH ₄ (ppm)	Gás CO ₂ (ppm)	Gás H ₂ S (ppm)	Razão CH ₄ /CO ₂	MCS* CH ₄ (%)	MCS* CO ₂ (%)
Ciclo 1	22	07/05/2021 16:41	3	7081	4600	130	1,5393	59,95	38,95
Ciclo 2	7	14/05/2021 12:14	3	7288	4600	101	1,5843	60,79	38,37
Ciclo 3	4	18/05/2021 01:58	3	7272	4600	97	1,5809	60,76	38,43
Ciclo 4	4	23/05/2021 03:07	3	7297	4600	58	1,5863	61,04	38,48
Ciclo 5	4	28/05/2021 15:31	3	7315	4600	54	1,5902	61,12	38,43
Valores Médios - Ciclos:				7251	4600	88	1,5762	60,73	38,53
*Proporção MCS: Porcentagem em relação a soma total dos gases lidos (Gás Metano + Gás Carbônico + Gás Sulfídrico)									

Fonte: Autor (2021)

Este protótipo sem filtros apresentou a seguinte relação média entre as leituras dos gases monitorados presentes no biogás: (Gás Metano: 60,73% e Gás Carbônico: 38,53% com uma concentração de gás sulfídrico de 88 ppm). Observando-se uma produção mais acentuada de gás sulfídrico após os 20 primeiros dias até aproximados 30 dias de processo de biodigestão apresentando uma queda acentuada após o primeiro mês.

Para o protótipo do biodigestor 2, conforme a **Tabela 11** abaixo:

Tabela 11 – Dados coletados no sistema UNIBIO para o Biodigestor 2

Filtro Sólido: Nenhum / Filtro Líquido: Água potável

Ciclos	Tempo Saturação (Dias)	Leitura CO ₂ (5000 ppm) Data / Hora	Pressão Gás (kPa)	Gás CH ₄ (ppm)	Gás CO ₂ (ppm)	Gás H ₂ S (ppm)	Razão CH ₄ /CO ₂	MCS* CH ₄ (%)	MCS* CO ₂ (%)
Ciclo 1	23	09/05/2021 20:36	4	8476	4600	30	1,8426	64,68	35,10
Ciclo 2	6	15/05/2021 21:35	4	8605	4600	29	1,8707	65,02	34,76
Ciclo 3	4	19/05/2021 03:44	4	8594	4600	33	1,8683	64,97	34,78
Ciclo 4	4	23/05/2021 12:03	4	8608	4600	31	1,8713	65,02	34,75
Ciclo 5	5	29/05/2021 01:23	4	8596	4600	34	1,8687	64,97	34,77
Valores Médios - Ciclos:				8576	4600	31	1,8643	64,93	34,83
*Proporção MCS: Porcentagem em relação a soma total dos gases lidos (Gás Metano + Gás Carbônico + Gás Sulfídrico)									

Fonte: Autor (2021)

Este protótipo apresentava uma camada de filtro líquido para o biogás composta por água potável. Obtendo a seguinte relação média entre as leituras dos gases monitorados presentes no biogás: (Gás Metano: 64,93% e Gás Carbônico: 34,83% com uma concentração de gás sulfídrico de 31,4 ppm). Nota-se que esse tipo de filtro teve uma considerável influência se comparado ao protótipo biodigestor 1. Apresentando uma melhor retenção do gás carbônico assim como uma diminuição na concentração de gás sulfídrico presente no biogás.

Para o protótipo do biodigestor 3, conforme a **Tabela 12** abaixo:

Tabela 12 – Dados coletados no sistema UNIBIO para o Biodigestor 3

Filtro Sólido: Esponja de Aço Carbono / Filtro Líquido: Água potável

Ciclos	Tempo Saturação (Dias)	Leitura CO ₂ (5000 ppm) Data / Hora	Pressão Gás (kPa)	Gás CH ₄ (ppm)	Gás CO ₂ (ppm)	Gás H ₂ S (ppm)	Razão CH ₄ /CO ₂	MCS* CH ₄ (%)	MCS* CO ₂ (%)
Ciclo 1	24	10/05/2021 06:07	4	9052	4600	16	1,9678	66,23	33,66
Ciclo 2	6	16/05/2021 00:45	4	9333	4600	16	2,0289	66,91	32,98
Ciclo 3	3	19/05/2021 14:28	4	9337	4600	17	2,0298	66,91	32,96
Ciclo 4	4	24/05/2021 01:33	4	9327	4600	17	2,0276	66,89	32,99
Ciclo 5	5	28/05/2021 19:21	4	9339	4600	16	2,0302	66,92	32,96
Valores Médios - Ciclos:				9278	4600	16	2,0169	66,77	33,11
*Proporção MCS: Porcentagem em relação a soma total dos gases lidos (Gás Metano + Gás Carbônico + Gás Sulfídrico)									

Fonte: Autor (2021)

Este protótipo apresentava uma camada de filtro sólido composta por uma coluna de esponja de aço carbono, além de uma segunda camada de filtro líquido composta por água potável. Apresentando a seguinte relação média entre as leituras dos gases monitorados presentes no biogás: (Gás Metano: 66,77% e Gás Carbônico: 33,11% com uma concentração de gás sulfídrico de 16,6 ppm). Nota-se que esse tipo de filtro também teve uma considerável influência nos parâmetros do biogás medido se comparado ao protótipo biodigestor 1 apresentando uma melhor retenção de gás carbônico. E uma melhor retenção de sulfetos de comparado ao biodigestor 2 reduzindo os valores presentes de gás sulfídrico no biogás.

Para o protótipo do biodigestor 4, conforme a **Tabela 13** abaixo:

Tabela 13 – Dados coletados no sistema UNIBIO para o Biodigestor 4

Filtro Sólido: Palha de Aço Carbono / Filtro Líquido: Água potável

Ciclos	Tempo Saturação (Dias)	Leitura CO ₂ (5000 ppm) Data / Hora	Pressão Gás (kPa)	Gás CH ₄ (ppm)	Gás CO ₂ (ppm)	Gás H ₂ S (ppm)	Razão CH ₄ /CO ₂	MCS* CH ₄ (%)	MCS* CO ₂ (%)
Ciclo 1	24	10/05/2021 03:07	4	8870	4600	17	1,9283	65,76	34,11
Ciclo 2	6	16/05/2021 02:17	4	9031	4600	18	1,9633	66,17	33,70
Ciclo 3	3	19/05/2021 10:26	4	9034	4600	17	1,9639	66,18	33,70
Ciclo 4	4	23/05/2021 16:13	4	9035	4600	19	1,9641	66,17	33,69
Ciclo 5	5	28/05/2021 10:45	4	9022	4600	20	1,9613	66,13	33,72
Valores Médios - Ciclos:				8998	4600	18	1,9562	66,08	33,78
*Proporção MCS: Porcentagem em relação a soma total dos gases lidos (Gás Metano + Gás Carbônico + Gás Sulfídrico)									

Fonte: Autor (2021)

Este protótipo apresentava uma camada de filtro sólido composta por uma coluna de palha de aço carbono além de uma camada de filtro líquido composta por água potável. Obtendo a seguinte relação média entre as leituras dos gases monitorados presentes no biogás: (Gás Metano: 66,08% e Gás Carbônico: 33,78% com uma concentração de gás sulfídrico de 18,4 ppm). Nota-se uma relação bem próxima na retenção do CO₂ se comparado ao biodigestor 3, porém com uma pequena queda na qualidade de retenção dos sulfetos se comparado ao biodigestor 3. Entretanto com uma qualidade filtrante bem superior se comparado aos protótipos: biodigestor 1 e biodigestor 2.

A **Tabela 14** mostra o resultado consolidado para todos os protótipos biodigestores.

Tabela 14 – Resultado consolidado de todos os protótipos (biodigestor 1,2,3 e 4)

Protótipo	Filtro		Gás ch ₄ (ppm)	Gás co ₂ (ppm)	Gás h ₂ s (ppm)	Razão CH ₄ /CO ₂	MCS*		Desempenho Filtragem	
	Líquido	Sólido					CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	CO ₂	H ₂ S
BIO 1	Sem filtro	Sem filtro	7251	4600	88	1,5762	60,73	38,53	4°	4°
BIO 2	Água potável	Sem filtro	8576	4600	31	1,8643	64,93	34,83	3°	3°
BIO 3	Água potável	Esponja de aço carbono	9278	4600	16	2,0169	66,77	33,11	1°	1°
BIO 4	Água potável	Palha de aço carbono	8998	4600	18	1,9562	66,08	33,78	2°	2°
*Proporção MCS: Porcentagem em relação a soma total dos gases lidos (Gás Metano + Gás Carbônico + Gás Sulfídrico)										

Fonte: Autor (2021)

O protótipo biodigestor 1, modelo de referência para geração de biogás na sua forma natural sem sistema de filtragem para o biogás, apresentou os seguintes valores aproximados na relação de gases monitorados: Gás Metano (60,73%), Gás Carbônico (38,53%), Gás Sulfídrico (88 ppm).

Segundo Alcócer *et al.* (2019) os valores esperados para a composição do biogás gerado a partir de esterco bovino variam entre os valores:

Gás Metano (de 55% a 75%), Dióxido de Carbono (25% a 45%), Gás Sulfídrico (<1%) outros gases (<5%). No qual os valores obtidos no protótipo de referência biodigestor 1 estão dentro das margens esperadas na literatura para o tipo de biomassa envolvida que no caso é o esterco bovino fresco.

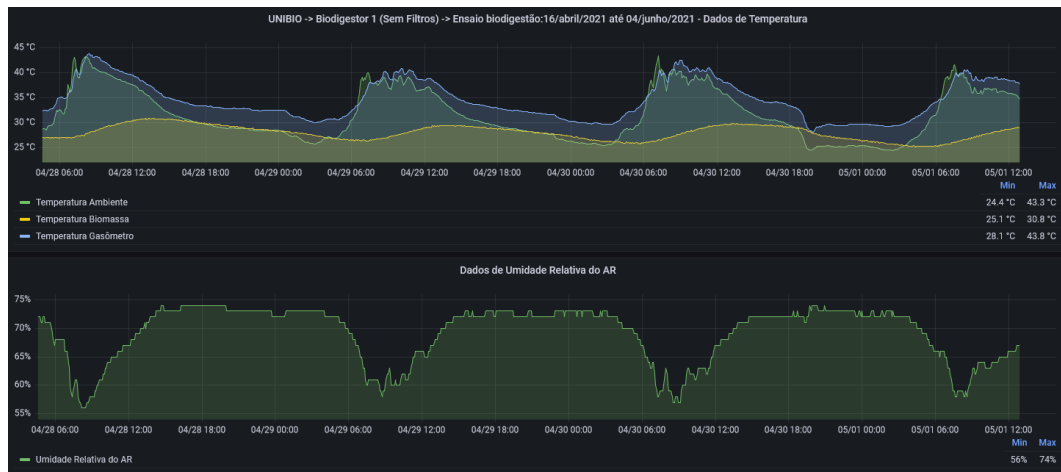
A partir da **Tabela 14** verificou-se que o protótipo que apresentou melhor desempenho na filtragem do biogás com uma melhor retenção de gás carbônico e com uma menor presença de sulfeto de hidrogênio, foi o protótipo de biodigestor 3, que possuía a combinação de filtro de água com filtro de esponja de aço. Apresentou Gás Metano na proporção (66,77%) e Gás Carbônico na proporção de (33,11%), além de Gás Sulfídrico na concentração de (16,6 ppm). O desempenho foi de aproximadamente 81% de retenção do H₂S e 14% de retenção de CO₂, se comparado com os resultados do protótipo de referência (biodigestor 1).

O protótipo biodigestor 4, que tinha sistema de filtros composto por água potável combinado com palha de aço, teve o segundo melhor rendimento entre todos os protótipos do ensaio. Tendo um desempenho aproximado de 12% para retenção do CO₂ e 79% em retenção de H₂S se comparado com os resultados do protótipo de referência (biodigestor 1).

O biodigestor 2 que possui uma camada filtro líquido para o biogás composta por uma coluna de água potável teve o terceiro melhor rendimento em filtragem com desempenho aproximado de 10% para retenção do CO₂ e 64% em retenção de H₂S se comparado com os resultados do protótipo de referência (biodigestor 1).

O sistema UNIBIO permitiu também a visualização detalhada da variação de temperatura e umidade relativa do ar no biodigestor.

Figura 109 – Gráfico de Dados: BIODIGESTOR 1 – Temperatura + Umidade



Fonte: Autor (2021)

Para os dados de temperatura analisados para o biodigestor 1 podemos inferir que a biomassa atingiu uma temperatura mínima de 23,1 °C e uma temperatura máxima de 30,8 °C durante todo o ciclo de biodigestão anaeróbia ficando assim dentro de uma faixa segura para o processo de biodigestão que é entre 15 °C e 40 °C (SOUZA, 1984).

Ainda segundo Souza (1984), a faixa de melhor eficiência de temperatura está entre 30 °C e 40 °C para a fase de metagênese. O que podemos avaliar que os equipamentos poderiam ainda sofrer uma maior exposição ao sol para que a digestão anaeróbia tivesse um aumento de eficiência no processo de geração do biogás. O monitoramento de temperatura propiciava um grau de segurança emitindo alertas ao usuário caso a variação de temperatura na biomassa extrapolasse a margem de variação permitida para a sobrevivência das bactérias de metanogênese.

Os demais equipamentos biodigestores (2, 3 e 4) apresentaram resultados semelhantes para as variações de temperatura devido estarem no mesmo ambiente físico.

5. CONCLUSÕES

Os protótipos construídos de biodigestores do tipo batelada com as adaptações mecânicas propostas e realizadas propiciaram a realização dos experimentos de ciclos de digestão anaeróbia, assim como sua repetição ocorreu de forma prática e de manejo simplificado tanto para carga de substrato como para limpeza pós-ciclo, possibilitando uma fácil alimentação e substituição de filtros sólidos e líquidos para o biogás.

A construção dos componentes de hardware como o controlador IoT e os módulos de sensores para os protótipos de biodigestor batelada permitiram a realização de leituras internas aos reatores anaeróbios dos parâmetros ambientais como temperaturas (biomassa, biogás, ambiente), umidade relativa do ar, pressão manométrica, concentração dos gases (metano, sulfídrico e carbônico).

O desenvolvimento dos módulos de software propiciou ferramentas de acompanhamento e análise dos dados que foram coletados e armazenados em banco de dados do processo de digestão anaeróbia. Os dados poderiam ser acessados em tempo real ou delineados pela série histórica do período completo da biodigestão através de um computador conectado à internet. O sistema UNIBIO também apresentava gráficos analíticos comparando o desempenho dos biodigestores e seus filtros aplicados ao biogás. O sistema apresenta também uma funcionalidade de catalogação de projetos de biodigestores.

No experimento do ensaio de elementos filtrantes para o biogás compostos por filtros líquidos e sólidos combinados em quatro protótipos distintos, verificou-se que o filtro de biogás que apresentou melhor desempenho na filtragem foi o filtro combinado de água potável com esponja de aço carbono, obtendo gás Metano na proporção de 66.7% com a presença de Sulfeto de Hidrogênio na concentração de 16 ppm. Comparado ao protótipo referência que não possuía nenhum filtro e produziu gás Metano na proporção de 60,7% e sulfeto de hidrogênio na concentração de 88 ppm.

Conclui-se que o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de biodigestores através da plataforma IoT com suporte de hardware através de microcontroladores e sensores de baixo custo, no qual denominamos esta solução de sistema UNIBIO, se mostrou adequada técnica e financeiramente para a aplicação em sistemas de biodigestão anaeróbia, fornecendo dados que possibilitem uma tomada de decisão que resulte na melhoria da eficiência e otimização do processo de digestão anaeróbia. Permite mensurar e comparar quantitativamente o desempenho de diferentes biomassas na produção de biogás assim como analisar a eficiência de elementos filtrantes para o biogás produzido.

Os valores obtidos pelo sistema de monitoramento ficaram dentro dos níveis esperados pela literatura e sugere-se para pesquisas futuras. A continuidade de ensaios com o sistema UNIBIO utilizando outras fontes de biomassa e novas combinações de biofiltros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, Tasneem; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, Shahid A. **Biogas energy**. Springer Science & Business Media, 2011.

AL MAMUN, Muhammad Rashed; TORII, Shuichi. Removal of hydrogen sulfide (H₂S) from biogas using zero-valent iron. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 3, n. 6, p. 428-432, 2015.

ALCÓCER, J. C. A. et al. Produzindo Biogás a partir de Resíduos de Frutas para Gerar Energia Elétrica. **Revista SODEBRAS**, v. 5, p. 113, 2014.

ALCÓCER, Juan Carlos Alvarado; Pinto, Olienade Ribeiro de Oliveira; Silva, Maria Lucilene da; Queiroz, Maria Benevides de. **Biodigestores Rurais: Uma Alternativa à Sustentabilidade Ambiental?** Fortaleza, CE: Imprece, 2019.

BAHMANI, Amir-H. et al. Parallel algorithms for automatic database normalization. In: **2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)**. IEEE, 2010. P. 157-161.

BARREIRA, Paulo. **Biodigestores**: 5. Ed. São Paulo: Editora Ícone, 2011.

BARROS, Talita Delgrossi. **Biofertilizante**. Brasília, DF: AGEITEC, [2017]. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fjaakw3q02wyiv809gkz5151b3dhe.html>>. Acesso em: 31 mar. 2021.

BHOJARAJU, G.; KOGANURMATH, MM. **Database System: Concepts and Design**. [2013]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Bhojaraju-Gunjal/publication/257298522_Database_Management_Concepts_and_Design/links/00b4952f27a964d917000000/Database-Management-Concepts-and-Design.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2021.

BNDES. **Biogás**: a próxima fronteira da energia renovável. BNDES. [S. l.]. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/biogas>>. Acesso em: 17 mai. 2021.

BOE, Kanokwan; BATSTONE, Damien J.; STEYER, Jean-Philippe; ANGELIDAKI, Irini. State indicators for monitoring the anaerobic digestion process. In: **Water Research**. 2010, Vol. 44. Pp. 5973-5980.

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.

DEGANUTTI, Roberto, Palhaci, Maria do Carmo Jampaulo Plácido, Rossi, Marco et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4. 2002, Campinas. **Proceedings online....** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100031&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 31 Mar. 2021.

DE MELO SILVA, Caio César, et al. Design and Evaluation of a Services Interface for the Internet of Things. **Wireless Personal Communications**, vol. 91, no. 4, 2016, pp. 1711–1748.

ELMASRI, Ramez; NAVATHE, Shamkant B. **Sistemas de Banco de Dados**. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2005.

EMAS Jr. **Tipos de biodigestor**: entenda o funcionamento e qual é o melhor para você. [S. l.], 16 mar. 2020. Disponível em: <<https://emasjr.com.br/entenda-os-tipos-de-biodigestor-e-qual-e-o-mais-adequado-para-voce/>>. Acesso em: 31 mar. 2021.

FAYOS-JORDAN, Rafael et al. VentQsys: Low-cost open IoT system for CO2 monitoring in classrooms. **Wireless Networks**, v. 27, n. 8, p. 5313-5327, 2021.

FIELDING, Roy Thomas. **Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures**. PhD thesis, University of California, 2000. Disponível em: <https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/fielding_dissertation.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2021.

FRARE, Laercio Mantovani; GIMENES, Marcelino Luiz; PEREIRA, Nehemias Curvelo. Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás. **ver. Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 167-172, 2009.

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.

FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146-157, 2019.

GARCIA JUNIOR, L. C.; PIRES, M. V.; DA CUNHA, D. A. BIODIGESTORES PARA A MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELA BOVINOCULTURA NA REGIÃO SUDESTE, BRASIL. **Revista de Economia e Agronegócio**, [S. l.], v. 14, n. 1,2,3, 2016. DOI: 10.25070/rea.v14i1,2, 3.355. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rea/article/view/7667>. Acesso em: 17 maio. 2021.

GILCHRIST, Alasdair. *Industry 4.0: the industrial internet of things*. Apress, 2016.

LEITE, J.R. Emiliano et. al.; **A INTERNET das COISAS (IoT): Tecnologias e Aplicações**. In: Brazilian Technology Symposium, 2017, Campinas-SP. Disponível em: <<https://www.lcv.fee.unicamp.br/images/BTSym-17/Papers/76926.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

MAALEJ, Walid; ROBILLARD, Martin P. Patterns of knowledge in API reference documentation. In: **IEEE Transactions on Software Engineering**, v. 39, n. 9, p. 1264-1282, 2013.

MAROLI, Ankit; NARWANE, Vaibhav S.; GARDAS, Bhaskar B. Applications of IoT for achieving sustainability in agricultural sector: A comprehensive review. **Journal of Environmental Management**, v. 298, p. 113488, 2021.

MCROBERTS, Michael. **Arduino básico**. Novatec Editora, 2018.

MEHTA, Mannan. ESP 8266: a breakthrough in wireless sensor networks and internet of things. **International Journal of Electronics and Communication Engineering & Technology**, v. 6, n. 8, p. 7-11, 2015.

MEIRA, Msc. Regilan. **Banco de Dados**. Bahia: IFBA-Campus Ilhéus, [2013]. Disponível em: <<http://www.regilan.com.br/wp-content/uploads/2013/10/Apostila-Banco-de-Dados.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

MILANEZ, Artur Yabe *et al.* Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. In: **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 47, p. [221]-275, mar. 2018.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1986.

OFOEFULE, A. U.; UZODINMA, E. O. Biogas production from blends of cassava (Manihot utilissima) peels with some animal wastes. In: **International Journal of Physical Sciences** Vol. 4 (7), pp. 398-402, Julho, 2009.

PENIDO, Édilus de Carvalho Castro; TRINDADE, Ronaldo Silva. **Microcontroladores**. Ouro Preto, MG: IFMG; Rede eTec Brasil, 2013. Disponível em: <<https://www2.ifmg.edu.br/ceadop3/apostilas/microcontroladores>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

PEREIRA, Lorena *et al.* A CONSTRUÇÃO E O PAPEL AMBIENTAL DE UM BIODIGESTOR. **De Magistro de Filosofia**, Ano V, no.09, p. 17-29, 2012.

PINTO, Olienai de Oliveira *et al.* **USO DO BIODIGESTOR**: Uma proposta sustentável na zona rural do Maciço de Baturité, Ceará. 2018. Disponível em: <<https://revistaea.org/artigo.php?idartigo=3347>>. Acesso em: 17 mai. 2021.

POZDNYAKOVA, Ulyana A. et al. Genesis of the revolutionary transition to industry 4.0 in the 21st century and overview of previous industrial revolutions. In: **Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century**. Springer, Cham, 2019. p. 11-19.

PRESSE, France. **Concentração de gases do efeito estufa bate recorde em 2018, diz agência da ONU**. [S. l.], 24 nov. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2019/11/25/concentracao-de-gases-do-efeito-estufa-bate-recorde-em-2018-diz-agencia-da-onu.ghtml>>. Acesso em: 31 mar. 2021.

RODRÍGUEZ, Carlos et al. REST APIs: A large-scale analysis of compliance with principles and best practices. In: **Lecture Notes in Computer Science**. Springer International Publishing, 2016, pp. 21–39.

SALVADORI, Ivan ; SIQUEIRA, Frank. A maturity model for semantic restful web apis. In: **2015 IEEE International Conference on Web Services**. IEEE, 2015. p. 703-710, New York-USA. .

SANSUY. **Biodigestor Plus**: como funciona e quais são as vantagens. [S. l.], 20 nov. 2021. Disponível em: <<https://blog.sansuy.com.br/biodigestor-plus/>>. Acesso em: 31 mar. 2021.

SANTOS, Bruno P. et. al.; **Internet das Coisas**: da Teoria à Prática. Belo Horizonte-MG, UFMG, [2016]. Disponível em: <<https://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

SCHWAB, Klaus. **The fourth industrial revolution**. Currency, 2017.

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.

SILVA, Wellington Regis. **Kinetics study of the process of anaerobic digestion of vegetable residual solids**. 2009. 201 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

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

STOLOJESCU-CRISAN, Cristina; CRISAN, Calin; BUTUNOI, Bogdan-Petru. An IoT-Based Smart Home Automation System. **Sensors**, v. 21, n. 11, p. 3784, 2021.

SUKHODOLOV, Yakov A. The notion, essence, and peculiarities of industry 4.0 as a sphere of industry. In: **Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century**. Springer, Cham, 2019. p. 3-10.

THE BIOGAS. **Biogas Composition**. [S. l.], 2009. Disponível em: <http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition>. Acesso em: 31 mar. 2021.

THOMAZINI, Daniel; DE ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. Saraiva Educação SA, 2020.

TORRES, Aline; PEDROSA, João Felipe; MOURA, JP de. Fundamentos de implantação de biodigestores em propriedades rurais. **Educação Ambiental em Ação**, n. 40, 2009.

WOOLHOUSE, H. W. The biochemistry and regulation of senescence in chloroplasts. **Canadian Journal of Botany**, v. 62, n.12, p.2934-3942, 1984.