



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DE COMPUTAÇÃO

FILIPPE MESEL LOBO COSTA CARDOSO

Monitoramento de Voláteis de Plantas Utilizando Sensores de Qualidade do Ar

Recife

2024

FILIPPE MESEL LOBO COSTA CARDOSO

Monitoramento de Voláteis de Plantas Utilizando Sensores de Qualidade do Ar

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Sistemas Embarcados

Orientador: Prof. Dr. Stefan Michael Blawid

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Cardoso, Filipe Mesel Lobo Costa.

Monitoramento de Voláteis de Plantas Utilizando Sensores de Qualidade do Ar / Filipe Mesel Lobo Costa Cardoso. - Recife, 2024.

206f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Orientação: Stefan Michael Blawid.

1. Agricultura inteligente; 2. Detecção de patógenos; 3. Redes de Internet das Coisas; 4. IoT; 5. Sensores de qualidade do ar; 6. Monitoramento de saúde vegetal. I. Blawid, Stefan Michael. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 621.39

Filipe Mesel Lobo Costa Cardoso

**“Monitoramento de Voláteis de Plantas Utilizando Sensores
de Qualidade do Ar”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Engenharia da Computação.

Aprovado em: 18/12/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato Mariz de Moraes
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Vítor de Andrade Coutinho
Departamento de Computação / UFRPE

Prof. Dr. Stefan Michael Blawid
Centro de Informática / UFPE
(**orientador**)

À memória de Luciano Mesel de Castro Lobo, em homenagem ao seu constante apoio, às valiosas lições de vida compartilhadas e ao legado acadêmico que iluminou minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo por estar iluminando meu caminho ao longo dos degraus da escada de Jacó com luz, saúde, honestidade e retidão.

A minha mãe, Lucia Mesel de Castro Lobo, por ter me proporcionado educação e por ter permitido que eu seguisse o caminho das ciências exatas.

Aos meus avós, Clarice Mesel de Castro Lobo e Luciano Mesel de Castro Lobo, pelo apoio, pelas experiências de vida e pela bagagem acadêmica que compartilharam comigo.

Ao meu irmão, Arthur Mesel Lobo Costa Cardoso, pelo apoio que tem me dado em minhas decisões e por me acompanhar ao longo da árdua e bela trajetória da engenharia.

Ao meu irmão Gerson Alves Marques por ter contribuído para minha formação como Demolay e como homem.

Ao meu irmão Marco Aurélio Lisboa Arregui por ter me apresentado o caminho das sete virtudes cardeais para formar homens de bem.

Aos meus irmãos da Augusta e Respeitável Loja Simbólica Redenção do Oriente por ter permitido que eu conhecesse a luz da sabedoria e por ter derramado suas experiências sobre mim.

Aos meus irmãos do Capítulo União da Torre por me permitir seguir o caminho dos homens de bem sem perder o foco nas sete virtudes cardeais de um Demolay;

Ao professor Stefan Michael Blawid que permitiu a construção de um tema de pesquisa tão excitante e a elaboração de um grupo de pesquisa colaborativo.

Ao professor Diego Leite da Cunha por ter possibilitado experiências que enriqueceram meus conhecimentos sobre desenvolvimento de pesquisas e elaboração de artigos.

Ao coordenador do curso de Engenharia de Controle e Automação, professor Methódio Varejão de Godoy, pelos ensinamentos e conselhos que moldaram minha trajetória acadêmica.

Ao professor Elyr Teixeira de Almeida Alves, por proporcionar que eu conhecesse sobre microcontroladores; por me apresentar ao mercado de sistemas embarcados. Por permitir que eu me descobrisse como profissional de engenharia de sistemas e

pelo apoio ao longo da realização do trabalho de conclusão de curso (TCC).

A Wellington Messias Silva de Oliveira pela contribuição na minha formação como engenheiro de sistemas; por me apresentar a ciência de antenas, rádios e telemetria; por permitir minha evolução profissional; pelo apoio ao longo da elaboração do estudo que compõe minha dissertação de mestrado; por ser meu mentor, meu espelho como engenheiro e como pessoa.

"A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê." (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Diante dos desafios enfrentados pela agricultura, marcados pelo aumento populacional e mudanças climáticas, surge a necessidade de explorar métodos eficazes de detecção de sinais relacionados à saúde de plantações agrícolas. Este estudo propõe uma análise da transformação digital que as redes de sensores sem fio podem introduzir no ambiente agrícola, com foco na utilização de sensores de qualidade do ar de baixo custo para monitorar a respiração e emissão de compostos orgânicos voláteis por culturas. Experimentos detalhados com sensores, como CCS811, BME680 e SGP30, revelaram informações cruciais sobre seu funcionamento e aplicabilidade no monitoramento de culturas. A pesquisa expandiu-se para análises de séries temporais, transformadas discreta de Fourier e correlações, destacando a influência da presença da planta nas variáveis medidas. Os resultados indicaram diferenças marcantes entre nós sensores próximos e distantes das plantas, enfatizando o potencial impacto na qualidade do ar e nas condições ambientais. A dissertação conclui reforçando a viabilidade de sistemas inteligentes de sensoriamento na agricultura e orientando para pesquisas futuras na detecção precoce de problemas fitossanitários.

Palavras-chaves: Agricultura inteligente; Detecção de patógenos; Redes de Internet das Coisas; IoT; Sensores de qualidade do ar; Monitoramento de saúde vegetal

ABSTRACT

Facing challenges in agriculture due to population growth and climate change, there is a growing need to explore effective methods for detecting signals related to the health of agricultural crops. This study proposes an analysis of the digital transformation that wireless sensor networks can bring to the agricultural environment, focusing on the use of low-cost air quality sensors to monitor crop respiration and volatile organic compound emissions. Detailed experiments with sensors such as CCS811, BME680, and SGP30 provided crucial insights into their operation and applicability in crop monitoring. The research employed time series analyses, discrete Fourier transform, and correlations, highlighting the influence of plant presence on the measured variables. The results indicated significant differences between sensors near and far from the plants, emphasizing the potential impact on air quality and environmental conditions. The dissertation concludes by reinforcing the feasibility of intelligent sensing systems in agriculture and providing guidance for future research in early detection of phytosanitary issues.

Keywords: Smart agriculture; Pathogen detection; Internet of Things networks; IoT, Air quality sensors; Plant health monitoring

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicações de IoT na Agricultura. Fonte: Farooq et al. (2020)	33
Figura 2 – Componentes de um sensor inteligente. Fonte: Sinha e Dhanalakshmi (2022)	35
Figura 3 – Aplicação de Sensores inteligentes na agricultura. Fonte: Said Mohamed et al. (2021)	36
Figura 4 – Classificação de sensores IoT. Fonte: Sinha e Dhanalakshmi (2022)	37
Figura 5 – Camadas TCP/IP. Fonte: Adaptado de Torres (2014)	39
Figura 6 – Rede Mesh de Sensores. Fonte: Espressif (2016)	45
Figura 7 – Camadas do padrão IEEE 802.11. Fonte: Adaptado de Torres (2014)	51
Figura 8 – Diagrama do ciclo de VOCs. Fonte: Glaroudis, Iossifides e Chatzimisios (2020)	65
Figura 9 – Amostragem estática de <i>headspace</i> (SPME). Fonte: Adaptado de Tholl et al. (2006)	72
Figura 10 – Sensor de baixo custo para detecção de VOCs. Fonte: Catini et al. (2019)	79
Figura 11 – Cenários de testes do sensor de Catini et al. (2019). Fonte: Catini et al. (2019)	80
Figura 12 – Gráficos de umidade, temperatura, luz e VOCs. Fonte: Adaptado de Catini et al. (2019)	81
Figura 13 – Flor no estágio 8 sob análise. Fonte: Cheng et al. (2016)	83
Figura 14 – Rítmo de emissão de VOCs. Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2016)	84
Figura 15 – Sensor Versão I. Fonte: Própria.	91
Figura 16 – Sensor CCS811. Fonte: Própria.	92
Figura 17 – Sensor DHT 22. Fonte: Própria.	94
Figura 18 – ESP8266. Fonte: Própria.	94
Figura 19 – TP4056. Fonte: Própria.	95
Figura 20 – Bateria 18650. Fonte: Própria.	95
Figura 21 – Transdutor Inteligente II. Fonte: Própria.	96
Figura 22 – Diagrama de Blocos do ESP32. Fonte: Espressif (2023)	97
Figura 23 – Sensor SHT31. Fonte: Própria.	98

Figura 24 – Sensor BME680. Fonte: Própria.	99
Figura 25 – Sensor TSL 2561. Fonte: Própria.	100
Figura 26 – Sensor SGP30. Fonte: Própria.	101
Figura 27 – Diagrama de blocos do SGP30. Fonte: Sensirion (2021)	102
Figura 28 – Diagrama de casos de uso do <i>Firmware</i> Versão I. Fonte: Própria. . .	109
Figura 29 – Diagrama de Blocos do Sistema do <i>Firmware</i> Versão I. Fonte: Própria.	110
Figura 30 – Máquina de Estados do <i>Firmware</i> Versão I. Fonte: Própria.	110
Figura 31 – Bateria de casos de uso do <i>Firmware</i> Versão II. Fonte: Própria. . . .	113
Figura 32 – Diagrama de Blocos do Sistema do <i>Firmware</i> Versão II. Fonte: Própria.	113
Figura 33 – Máquina de estados do <i>Firmware</i> Versão II. Fonte: Própria.	114
Figura 34 – Diagrama de casos de uso do <i>Firmware</i> Versão III. Fonte: Própria. .	116
Figura 35 – Diagrama de Blocos do Sistema do <i>Firmware</i> Versão III. Fonte: Própria.	116
Figura 36 – Máquina de estados do <i>Firmware</i> Versão III. Fonte: Própria.	117
Figura 37 – Diagrama de casos de uso do <i>Firmware</i> do Nó-Raiz. Fonte: Própria.	118
Figura 38 – Diagrama de blocos do <i>Firmware</i> do Nó-Raiz. Fonte: Própria.	119
Figura 39 – Máquina de estados do <i>Firmware</i> do Nó-Raiz. Fonte: Própria.	119
Figura 40 – Exemplo de Planilha de dados gerados pelos sensores. Fonte: Própria.	120
Figura 41 – Etapas da Avaliação dos dados. Fonte: Própria.	121
Figura 42 – Impacto do Posicionamento da Fonte de Sinal utilizando o CCS811. Fonte: Própria.	122
Figura 43 – Ciclo Diurno Noturno. Fonte: Própria.	126
Figura 44 – Estufa. Fonte: Própria	128
Figura 45 – Rede Mesh. Fonte: Própria.	129
Figura 46 – Dados de tVOC amostrados quando o nó é exposto a respiração humana. Fonte: Própria.	133
Figura 47 – Dados de tVOC amostrados quando o nó é exposto a folha perfumada. Fonte: Própria.	134
Figura 48 – Ciclo Circadiano: Dados normalizados. Fonte: Própria.	135
Figura 49 – Ciclo Circadiano: Detalhe rítmico. Fonte: Própria.	136
Figura 50 – Série temporal de temperatura	138
Figura 51 – Séries temporais de iluminação. Fonte: Própria	140
Figura 52 – Séries temporais de umidade relativa. Fonte: Própria	143

Figura 53 – Séries temporais de pressão. Fonte: Própria.	144
Figura 54 – Séries temporais de resistência	147
Figura 55 – Séries temporais de COV. Fonte: Própria.	149
Figura 56 – Diagrama de blocos do SGP30. Fonte: Sensirion (2021)	149
Figura 57 – Séries temporais de Etanol. Fonte: Própria.	151
Figura 58 – Séries temporais de Etanol passando pelo algoritmo de processamento. Fonte: Própria.	152
Figura 59 – Matrizes de correlação. Fonte: Própria.	154
Figura 60 – FFT dos sinais tCOVs (a,b,c) e iluminação (d,e,f). Fonte: Própria. . .	156
Figura 61 – Comparação dos dados gerados pelo sensor próximo e distante da arruda. Fonte: Própria.	160
Figura 62 – Comparação dos dados gerados pelo sensor próximo e distante da arruda. Fonte: Própria.	163
Figura 63 – Comparação dos dados gerados pelo sensor próximo e distante da arruda em dB. Fonte: Própria.	164
Figura 64 – Sensor MQ-135 Circuito básico	181
Figura 65 – Sensor CCS 811. Fonte: Própria	182
Figura 66 – Sensor BME680. Fonte: Própria.	183
Figura 67 – Sensor SGP 30. Fonte: Própria	184
Figura 68 – Séries temporais de resistência (a,b) e COVs (c,d)	187

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Contribuições de Autores sobre COVs em Plantas. Fonte: Própria.	86
Quadro 2 – Requisitos Funcionais. Fonte: Própria.	109
Quadro 3 – Requisitos Funcionais do Projeto. Fonte: Própria.	112
Quadro 4 – Requisitos Funcionais do <i>Firmware</i> Versão III. Fonte: Própria. . . .	115
Quadro 5 – Requisitos Funcionais do <i>Firmware</i> do Nó-raiz. Fonte: Própria. . .	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de Sensores. Fonte: Adaptado de Catini et al. (2019)	78
Tabela 2 – Especificações do CCS811. Fonte: Própria.	92
Tabela 3 – Especificações do Sensor. Fonte: Própria.	93
Tabela 4 – Especificações do CI TP4056. Fonte: Própria.	95
Tabela 5 – Especificações da Bateria 18650. Fonte: Própria.	96
Tabela 6 – Valores limiares que promovem a indicação visual dos LEDs	121
Tabela 7 – Valores obtidos de temperatura do SHT31. Fonte: Própria	138
Tabela 8 – Valores obtidos de iluminância do TSL2561. Fonte: Própria	146
Tabela 9 – Valores obtidos de Temperatura do BME680. Fonte: Própria	146
Tabela 10 – Valores obtidos de umidade do BME680. Fonte: Própria.	146
Tabela 11 – Valores obtidos de pressão do BME680. Fonte: Própria.	146
Tabela 12 – Valores obtidos de resistência elétrica do BME680. Fonte: Própria. .	146
Tabela 13 – FFT Amplitudes de tCOVs emitido pela planta Arruda em diferentes condições. Fonte: Própria	157
Tabela 14 – Especificações do CCS 811	182

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital
ADDR	Endereço do Pino de Seleção
AMPE	Protocolo de Troca de Interconexão Direta Autenticado
AMQP	Protocolo Avançado de Filas de Mensagens
AODV	Protocolo de Roteamento de Vetor de Distância sob Demanda
ASCII	Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informações
CI	Circuito Integrado
CIN-UFPE	Centro de Informática da UFPE
CMOS	Semicondutor de Metal-Óxido
CMV	Vírus do Mosaico do Pepino
CO₂	Dióxido de Carbono
CoAP	Protocolo de Aplicação Restrita
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
CPU	Unidade de Processamento Central
CRC	Código de Correção de Erros
DDS	Serviço de Distribuição de Dados
DFT	Transformada Discreta de Fourier
DSDV	Protocolo de Destino Sequencial de Vetor de Distância
DSR	Protocolo de Roteamento Dinâmico de Origem
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIS	Sensor Rápido de Isopreno
GC	Espectrometria Gasosa
GC-MS	Espectrometria de Massa Acoplada
GLVs	Voláteis de Folhas Verdes
GPIOs	Pinos Gerais de Entradas e Saídas

HIPVs	Voláteis de Plantas Induzidos por Herbívoros
HP	Hewlett-Packard
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto
HWMP	Protocolo de Seleção de Caminho Híbrido Sem Fio de Malha
I2C	Interface Serial de Circuito Inter-Integrado
IAQ	Índice de Qualidade do Ar
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IoT	Internet das Coisas
IR	Espectroscopia de Infravermelho por Absorção
JA	Fitormônio Jasmonato
JAZs	Proteínas de Domínio ZIM de Jasmonato
LoRa	Protocolo de Transmissão de Dados em Longa Distância
MAC	Camada de Controle de Acesso ao Meio
MANETs	Redes Móveis Ad Hoc
MAP	Pontos de Acesso Mesh
MBSS	Conjunto Básico de Serviço de Malha
MEMS	Sensor de Aquecimento de Microestrutura Integrado
Mesh BSS	Conjunto Básico de Serviço de Malha
MP	Pontos Mesh
MPM	Protocolo Mesh Peer (Link Management)
MPPs	Pontos de Portal Mesh
MPRs	Retransmissões Multiponto
MQTT	Transporte de Telemetria de Mensagem em Filas
MS	Espectrometria de Massa
NIRS	Espectroscopia de Infravermelho por Aproximação
OLSR	Roteamento Otimizado por Estado de Enlace
PA	Agricultura de Precisão

PID	Detector de Fotoionização
PMKSA	Associação de Segurança de Chave Mestra Par-a-Par
PRRs	Padrões Receptores de Reconhecimento
PTR-MS	Espectrometria de Massa por Reação de Transferência de Prótons
PWM	Modulação por Largura de Pulso
RANN	Anúncio de Raiz
RFID	Identificação por Radiofrequência
RPL	Protocolo de Roteamento para Redes com Perda de Baixa Potência
RREP	Resposta de Rota
RREQ	Pacote de Solicitação de Rota
RTC	Relógio de Tempo Real
SAE	Autenticação Simultânea de Iguais
SAR	Resistência Sistêmica Adquirida
SI	Sistema Internacional de Unidades
SOC	System-On-Chip
SPI	Interface Serial Periférica
SPME	Micro Extração em Fase Sólida
TCP/IP	Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet
UART	Receptor/Transmissor Universal Assíncrono
ULP	Ultra Baixo Consumo
URI	Identificador Uniforme de Recurso
URL	Localizador de Recurso Uniforme
VPBs	Fenilpropanóides e Benzenóides Voláteis Florais
WLANS	Redes Locais Sem Fio
WMNs	Redes Mesh Sem Fio
WSNs	Redes de Sensores Sem Fio
XMPP	Protocolo Extensível de Mensagens e Presença

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	OBJETIVOS	24
1.1.1	Objetivo Geral	24
1.1.2	Objetivos Específicos	24
1.2	JUSTIFICATIVA	25
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	26
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	27
2.1	INTERNET DAS COISAS (IOT) E AGRICULTURA	27
2.1.1	O Conceito de IoT	27
2.1.2	IoT e Redes de Sensores sem Fio	30
2.1.3	Importância da IoT para Agricultura	31
2.1.4	Sensores e Monitoramento Agrícola	34
2.2	PROTOCOLO DE TRANSFERÊNCIA DE HIPERTEXTO	38
2.2.1	Conceitos e fundamentos	38
2.2.1.1	Funcionamento do HTTP	40
2.2.1.2	Mensagem HTTP	40
2.2.2	Aplicações de HTTP na agricultura	42
2.3	REDES DE MESH	44
2.3.1	Conceitos e fundamentos	44
2.3.2	Roteamento	46
2.3.2.1	Protocolo de Roteamento de Vetor de Distância sob Demanda em Redes Ad-hoc	47
2.3.2.2	Protocolo de Roteamento Otimizado por Estado de Enlace para Redes Ad Hoc	48
2.3.2.3	Roteamento Dinâmico de Fonte para Computadores Móveis	49
2.3.3	Mesh em redes IEEE 802.11	50
2.3.3.1	Formação da topologia IEEE 802.11	52
2.3.3.2	Protocolo Sem Fio Híbrido Mesh	54
2.3.4	Aplicações de redes mesh na agricultura	55
2.4	TÉCNICAS MATEMÁTICAS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS	57

2.4.1	Média	57
2.4.2	Matriz de Correlação	59
2.4.3	Análise de Fourier	61
2.5	RESUMO DO CAPÍTULO	63
3	TRABALHOS RELACIONADOS	64
3.1	O PAPEL DOS COVS NA COMUNICAÇÃO DAS PLANTAS	64
3.2	OS PROCESSOS TRADICIONAIS PARA COLETA E ANÁLISE DE COVS	70
3.2.1	Amostragem de COVs em regiões de superfície	70
3.2.2	Separação por cromatografia gasosa	74
3.2.3	Avaliação temporal de COVs	75
3.3	SENSORES ELETRÔNICOS ATUALMENTE UTILIZADOS NA DETECÇÃO DE COVS	76
3.4	NÓ SENSOR ELETRÔNICO	77
3.5	REGULAÇÃO DA EMISSÃO DE COVS PELO CICLO CIRCADIANO, LUZ E TEMPERATURA	82
3.6	RESUMO DO CAPÍTULO	84
4	MATERIAS E MÉTODOS	87
4.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	87
4.2	UNIVERSO E AMOSTRA	87
4.3	METODOLOGIA DA EXPERIMENTAÇÃO	88
4.4	SENSORES	90
4.4.1	Transdutor Inteligente Versão I	91
4.4.2	Transdutor Inteligente Versão II	96
4.5	RESUMO DO CAPÍTULO	104
5	DESENVOLVIMENTO	106
5.1	DESENVOLVIMENTO DOS <i>FIRMWARES</i>	106
5.1.1	<i>Firmware</i> Versão I	107
5.1.2	<i>Firmware</i> Versão II	111
5.1.3	<i>Firmware</i> Versão III	115
5.1.4	<i>Firmware</i> Nó-raiz	118
5.2	AVALIAÇÃO DOS DADOS	120
5.3	DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	121

5.3.1	Impacto do Posicionamento da Fonte de Sinal utilizando o CCS811	121
5.3.1.1	Teste A.1	123
5.3.1.2	Teste B.1	123
5.3.1.3	Teste C.1	123
5.3.1.4	Teste D.1	123
5.3.1.5	Teste E.1	123
5.3.1.6	Teste F.1	124
5.3.2	Limites de Detecção do SGP30	124
5.3.2.1	Teste A.2	124
5.3.2.2	Teste B.2	125
5.4	DETECÇÃO DE UMA PERIODICIDADE DIA-NOITE DE EMISSÃO DE TVOCS	125
5.5	EXPERIMENTOS NA ESTUFA	127
5.5.1	Avaliação das Séries Temporais	127
5.5.2	Avaliação da Correlação Entre os Parâmetros	128
5.5.3	Avaliação da Frequência do Ciclo Circadiano de Arruda	129
5.6	AVALIAÇÃO DA REDE <i>MESH</i> DE SENSORES	129
5.7	RESUMO DO CAPÍTULO	130
6	RESULTADOS	131
6.1	IMPACTO DO POSICIONAMENTO DA FONTE DE SINAL UTILIZANDO O CCS811	131
6.2	LIMITES DE DETECÇÃO DO SGP30	132
6.2.1	Teste A.2	133
6.2.2	Teste B.2	134
6.3	DETECÇÃO DE UMA PERIODICIDADE DIA-NOITE DE EMISSÃO DE TVOCS	135
6.4	EXPERIMENTOS NA ESTUFA	136
6.4.1	Avaliação das Séries Temporais	137
6.4.1.1	Considerações sobre as Medições do SHT31	137
6.4.1.2	Considerações sobre as Medições do TSL2561	139
6.4.1.3	Considerações sobre as Medições do BME680	141
6.4.1.4	Considerações sobre as Medições do SGP30	148
6.4.2	Avaliação da Correlação Entre os Parâmetros	153

6.4.3	Avaliação da Frequência do Ciclo Circadiano de Arruda	156
6.5	AVALIAÇÃO DA REDE <i>MESH</i> DE SENSORES	159
6.6	RESUMO	166
7	CONCLUSÃO	167
	REFERÊNCIAS	171
	ANEXO A – LISTA DE SENSORES DE QUALIDADE DO AR DE BAIXO CUSTO	179
	ANEXO B – CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MEDIÇÕES DE RE- SISTÊNCIA DO BME680	187
	ANEXO C – FUNÇÃO PARA GERAR GRÁFICOS A PARTIR DA FFT188	
	ANEXO D – LEITURA DE DADOS DE ETHANOL DO SGP30	190
	ANEXO E – FUNÇÃO PARA COLETAR DADOS E ARMAZENAR NO GOOGLE SHEETS	192
	ANEXO F – FUNÇÃO PARA RECORTAR E BAIXAR DATAFRAME	194
	ANEXO G – FUNÇÃO PARA AVALIAR ESTATISTICAMENTE	196

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população, conforme destacado por diversos estudos, por exemplo, Balaji, Nathani e Santhakumar (2019), Said Mohamed et al. (2021) e Zhao et al. (2010), vem gerando uma crescente demanda por produção de alimentos no mundo. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (do inglês FAO), a população mundial é estimada atingir 9,73 bilhões até 2050. O crescimento populacional implica em desafios para a produção agrícola, incluindo a redução da produtividade das culturas, como é o caso da salinidade do solo em condições áridas.

Além disso, mudanças climáticas têm impactos diretos na quantidade e qualidade das safras, aumentando a vulnerabilidade do solo à desertificação. Nesse contexto, é preciso pesquisar recursos de terra para o desenvolvimento agrícola, especialmente em regiões áridas. Em países emergentes (como o Brasil), o setor agrícola tem parcela significativa na economia nacional, sendo um dos principais pilares de renda. Desse modo, a implementação de novas tecnologias para aprimorar esse setor torna-se uma questão crucial para o sustento da economia.

Li, Gu e Yuan (2016) e Elhattab, Abouelmehdi e ElMoutaouakkil (2022) completaram ainda que a preocupação com os desafios enfrentados pela agricultura em decorrência do crescimento populacional e das mudanças climáticas está alinhada com a importância da internet das coisas (do inglês IoT) na agricultura. A conexão de dispositivos por meio da IoT tem desempenhado um papel importante na transformação digital em diversas áreas, incluindo a agricultura. A utilização de redes de sensores sem fio na agricultura permite monitorar, coletar e analisar dados em tempo real, proporcionando observações valiosas para otimizar processos e melhorar a produtividade. Diante deste contexto, o presente trabalho destaca a abordagem do desenvolvimento de uma rede mesh de sensores IoT de baixo custo, focalizando na medição de compostos orgânicos voláteis (COV) emitidos por plantas, além de outros parâmetros fundamentais como dióxido de carbono (do inglês CO₂), pressão, temperatura, hidrogênio, etanol e umidade.

Singh et al. (2021), Suresh e Priya (2020) e Naresh e Munaswamy (2019) contribuíram para o tema ao realçar que o uso de IoT com redes de sensores sem fio vem se

tornando cada vez mais importante na agricultura contemporânea. O monitoramento preciso e em tempo real oferecido por essas tecnologias possibilita uma gestão agrícola mais eficiente e sustentável. A ênfase na medição de COVs destaca-se como uma inovação significativa, pois esses compostos desempenham papel crucial em diversos processos fisiológicos e metabólicos das plantas. O principal objetivo deste estudo é desenvolver e avaliar uma rede mesh de sensores IoT capaz de monitorar de forma integrada e simultânea diversos parâmetros ambientais, com foco especial na resposta das plantas em diferentes condições. Para atingir esse propósito, foram realizados experimentos estruturados em quatro fases distintas.

Na primeira fase, a montagem de uma rede mesh com dois sensores inteligentes possibilitou investigar a capacidade desses dispositivos em detectar variações em proximidade a estímulos específicos, como a presença de um objeto em combustão, representado por uma folha de papel queimada. A segunda fase envolveu a observação da viabilidade dos transdutores inteligentes desenvolvidos em detectar aspectos da respiração humana e distingui-los de ruído de sinal.

A terceira fase concentrou-se na aquisição de dados em períodos prolongados, utilizando um dos sensores para enviar informações para uma planilha do Google Sheets via requisições por protocolo de transferência de hipertexto (do inglês HTTP). Este experimento foi conduzido em quatro cenários distintos, variando a condição da planta Arruda em relação à água e luz, permitindo correlacionar dados e explorar padrões temporais.

Na quarta fase, a rede mesh foi expandida, incluindo um nó-raiz responsável por centralizar os dados dos sensores e enviá-los para a planilha. A repetição do experimento anterior, agora com dois sensores, possibilitou a análise mais refinada da influência da proximidade do sensor em relação à planta, com a adição da aplicação da DFT para investigar a periodicidade do sinal coletado tanto pelo transdutor inteligente próximo da planta quanto do dispositivo distante da planta.

O desenvolvimento desta pesquisa não apenas representa uma inovação técnica na aplicação de redes mesh de sensores IoT na agricultura, mas também oferece contribuições práticas e teóricas para o entendimento dos processos bioquímicos das plantas em diferentes condições ambientais. A possibilidade de monitoramento em tempo real dos COVs e outros parâmetros propicia uma base sólida para a tomada de decisões mais assertivas na gestão agrícola, promovendo uma abordagem mais sus-

tentável e eficiente. Ao apresentar esses resultados, este trabalho visa consolidar-se como uma referência no campo da aplicação da IoT na agricultura, contribuindo para a expansão do conhecimento e aprimoramento das práticas agrícolas contemporâneas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar uma rede mesh de sensores IoT dedicada à medição de COVs e outros parâmetros ambientais em plantas, visando contribuir para a eficiência e sustentabilidade da agricultura. Propôs-se a elaborar uma infraestrutura tecnológica que possibilite a coleta integrada e simultânea de dados relevantes, promovendo uma compreensão mais profunda dos processos bioquímicos das plantas em diferentes condições ambientais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma rede mesh com sensores inteligentes capazes de detectar variações a estímulos específicos, como a presença de substâncias orgânicas voláteis e gás CO₂, utilizando uma folha de papel queimada, perfumada e uma planta do tipo Arruda como referência.
- Realizar experimentos de longa duração, utilizando um dos sensores para coletar dados em cenários distintos, variando as condições de luz e água da planta Arruda, e correlacionar esses dados para explorar padrões temporais. O objetivo é comparar os dados quando o vegetal é submetido a condições de estresse abiótico e a condições de habitat natural.
- Expandir a rede mesh para incluir um nó-raiz centralizador, permitindo a comunicação eficiente entre os sensores e a transmissão dos dados para uma planilha do Google Sheets via requisição HTTP.
- Repetir os experimentos em cenários distintos, variando as condições de luz e água da planta Arruda; com dois transdutores inteligentes, analisando a influên-

cia da proximidade do dispositivo em relação à planta e aplicando a DFT para investigar variações nos dados de COVs.

1.2 JUSTIFICATIVA

A tecnologia da IoT na agricultura tem sido reconhecida como um componente crucial para a integração de sensores, possibilitando a coleta instantânea de informações sobre plantas e animais. Esse fluxo contínuo de dados em tempo real capacita os agricultores a tomar decisões mais informadas e, conseqüentemente, mais lucrativas, como destacado por Li, Gu e Yuan (2016). A aplicação específica da IoT na agricultura, utilizando diversos dispositivos e protocolos de redes, oferece a capacidade de adquirir dados localmente em áreas como cultivo em campo aberto, beneficiando-se da diversidade de interfaces e protocolos disponíveis no campo da IoT. Outro aspecto relevante apontado por Said Mohamed et al. (2021) reforça que a IoT desempenha um papel fundamental no monitoramento de fatores cruciais para a tomada de decisões em ambientes agrícolas, incluindo condições climáticas, status de fertilidade e demanda de fertilizantes para o crescimento das culturas. Isso, por sua vez, contribui para a redução de perdas nas colheitas. A literatura existente também destaca que as aplicações da IoT na agricultura são diversificadas, abrangendo áreas como agricultura de precisão, monitoramento de irrigação, análise do solo, controle de temperatura, monitoramento de animais, umidade, prevenção de doenças, bem como gestão hídrica e fertilização.

A relevância da agricultura para a economia global é enfatizada por Singh et al. (2021), que ressalta seu papel vital no fornecimento das necessidades básicas para a vida humana. Diante da revolução tecnológica e do aumento da demanda por alimentos devido ao crescimento populacional, enfrentar desafios como atender às necessidades da crescente população global, reduzir os custos de produção e adaptar-se às mudanças climáticas tornou-se imperativo até 2030. A adoção da IoT e a integração da agricultura inteligente são identificadas como soluções promissoras para enfrentar esses desafios.

Portanto, diante desse cenário, percebe-se a necessidade de desenvolver procedimentos práticos para a criação de dispositivos de baixo custo e que são capazes de operar em redes descentralizadas, transmitindo dados sobre a saúde de elementos

agrícolas à internet. Essa iniciativa visa não apenas atender às demandas crescentes da agricultura moderna, mas também contribuir para a sustentabilidade, eficiência e resiliência do setor agrícola.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O presente documento é seguido pelos seguintes capítulos:

- **Conceitos Fundamentais:** Este capítulo contempla os conceitos fundamentais referentes à temática do trabalho proposto. Conceituando IoT, redes descentralizadas, protocolos de comunicação e a relevância dessas tecnologias para a agricultura no mundo moderno.
- **Trabalhos Relacionados:** Neste capítulo, são descritos os textos que exerceram forte influência na condução dos experimentos. Abordam-se trabalhos fundamentais para a elaboração dos sensores e para o entendimento dos processos de medição de COVs.
- **Materiais e Métodos:** Este capítulo classifica o modelo de pesquisa, define o universo, a amostra e descreve os aspectos de *hardware* dos dispositivos desenvolvidos ao longo do processo de pesquisa. Além de apresentar o processo para a visualização e tratamento dos dados.
- **Desenvolvimento:** Descreve os processos de desenvolvimento dos *softwares* e *firmwares* que regiram os hardwares e materiais estatísticos dos experimentos relatados nos Materiais e Métodos. O desenvolvimento também aborda o setup de configuração dos experimentos.
- **Resultados:** Descreve os resultados obtidos a partir dos experimentos conduzidos pelos pesquisadores. Foco na averiguação da capacidade dos dispositivos descritos no capítulo anterior em serem aplicados para o monitoramento da saúde de plantas e parâmetros ambientais.
- **Conclusão:** Este capítulo retrata as conclusões referentes aos resultados avaliados no capítulo anterior. Apresenta a espinha dorsal para pesquisas futuras.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O presente capítulo destina-se a apresentar as bases teóricas utilizadas como alicerce dos experimentos e pontuações apresentadas por este documento. Conceitos fundamentais estão separados em: Internet das Coisas (IoT) e Agricultura, Protocolo HTTP, Redes Mesh e resumo do capítulo.

2.1 INTERNET DAS COISAS (IOT) E AGRICULTURA

O presente subcapítulo destina-se a esclarecer o conceito de IoT e sua importância para o desenvolvimento dos processos agrícolas.

2.1.1 O Conceito de IoT

Akerlund e Nylén (2017), Gokhale, Bhat e Bhat (2018) e Balaji, Nathani e Santhakumar (2019) conceituaram IoT como uma rede de conexão entre objetos físicos, como veículos, celulares, televisões, edifícios e outros itens, utilizando tecnologia de eletrônicos, circuitos, sensores e conectividade de rede por meio da internet. Esta união possibilita a troca de dados entre esses objetos, permitindo o monitoramento e controle remoto utilizando a infraestrutura de rede existente. Čolaković e Hadžialić (2018) introduziu IoT como sendo um paradigma que oferece um conjunto de serviços para aplicações que possibilitam a integração do ciberespaço com o mundo físico. No entanto, apesar dos esforços de órgãos de padronização, alianças, indústrias, pesquisadores e outros, ainda existem inúmeros problemas a serem enfrentados para alcançar o pleno potencial da IoT. Essas questões devem ser consideradas sob diversos aspectos, como tecnologias habilitadoras, aplicações, modelos de negócios, impactos sociais e ambientais.

O termo foi proposto por Kevin Ashton em 1999, referindo-se à conexão entre Identificação por Radiofrequência (do inglês RFID) e a internet, integrando a rede virtual à física por meio de sensores espalhados. Contudo, discussões iniciais sobre uma rede de dispositivos inteligentes ocorrera em 1982, tendo como exemplo a máquina de refrigerantes da Universidade Carnegie Mellon, que se tornou o primeiro dispositivo

conectado à internet, capaz de transmitir seu inventário e temperatura das bebidas. Esse evento foi um marco inicial do conceito de IoT. Conforme citaram Lohiya e Thakkar (2021) e Salazar e Silvestre (2017).

A IoT, segundo Patel e Patel (2016), Morais, Sadok e Kelner (2019) e Karimi e Atkinson (2013) capacita a interação entre dispositivos sem a necessidade de intervenção humana e tem aplicações em áreas como saúde, transporte e indústria automotiva. Essa tecnologia enfrenta desafios, como infraestrutura, comunicações, interfaces, protocolos e padrões a serem superados. Além disso, a IoT se baseia em tecnologias como Redes de Sensores Sem Fio (do inglês WSNs) para conectar máquinas e seres humanos, buscando simplificar a interconexão e reduzir esforços manuais. O conceito abrange desde dispositivos de hardware até segurança da informação, proporcionando interações inteligentes em tempo real.

As redes IoT são suportadas por protocolos fornecidos por organizações como W3C, IETF, IEEE e ETSI, integrando o mundo físico ao virtual, viabilizando a troca de informações entre dispositivos físicos. O conceito subjacente permite que sensores e dispositivos compartilhem dados e se comuniquem através de concentradores de rede, abrindo possibilidades em áreas como monitoramento remoto e automação.

A definição de IoT é ampla, abrangendo desde a conexão entre casas e cidades até a monitorização remota em diversos setores. Está em constante evolução, assim como suas definições e aplicações, expandindo-se desde a integração entre objetos até a conexão inteligente e autônoma de dispositivos e máquinas.

A IoT, assim como demais redes de dispositivos capazes de realizar processamento, apresenta uma arquitetura definida. arquitetura de um sistema IoT deve garantir suas operações, conectando os mundos físico e virtual. O projeto da arquitetura envolve diversos fatores, como redes, comunicações e processos. Ao projetar a arquitetura do IoT, deve-se considerar a extensibilidade, escalabilidade e operabilidade entre os dispositivos. Como os dispositivos podem se mover e precisar interagir em tempo real, a arquitetura da rede deve ser adaptável para que os dispositivos interajam dinamicamente e ofereçam suporte à comunicação entre eles.

A arquitetura, que muitas vezes é orientada a serviços (SoA), trata um sistema complexo como um conjunto de objetos ou subsistemas bem definidos. Esses objetos ou subsistemas podem ser reutilizados e mantidos individualmente, permitindo a eficiente reutilização e atualização dos componentes de software e hardware em um

sistema IoT. A SoA é composta por quatro camadas com funcionalidades distintas, que fornecem interoperabilidade entre os dispositivos de várias maneiras:

- **Camada de Percepção:** Integra todos os objetos disponíveis (coisas) para detectar seu status.
- **Camada de Rede:** Constitui a infraestrutura que suporta as conexões sem fio ou com fio entre as coisas.
- **Camada de Serviço:** Cria e gerencia os serviços necessários para usuários ou aplicativos.
- **Camada de Interfaces:** Consiste nos métodos de interação com os usuários ou aplicativos.

A camada de percepção comporta os dispositivos físicos interagindo com o ambiente (lendo dados de grandezas físicas como temperatura e umidade) e enviando as informações a camada de rede. A camada de rede no IoT conecta todas as coisas e permite que elas estejam cientes de seu entorno. As coisas podem compartilhar dados umas com as outras, o que é crucial para o gerenciamento inteligente de eventos e processamento no IoT. Nesta camada, são abordadas questões como tecnologias de gerenciamento de rede, requisitos de qualidade de serviço (QoS), processamento de dados e segurança. A camada de serviço permite os serviços e aplicativos no IoT. É uma plataforma econômica onde software e hardware podem ser reutilizados. Esta camada executa as atividades orientadas a serviços, como troca de informações, gerenciamento de dados, mecanismos de busca e comunicação. No IoT, uma grande quantidade de dispositivos está conectada, pertencentes a diferentes pessoas e, portanto, nem sempre estão em conformidade com os mesmos padrões. É necessário resolver problemas de compatibilidade entre as coisas para a interação entre elas. A camada de interface trabalha no frontend da aplicação ou API (Interface de Programação de Aplicações) para simplificar a gestão e interconexão das coisas.

Čolaković e Hadžialić (2018) abordaram as questões e desafios-chave relacionados à IoT. Destacaram que os sistemas baseados em IoT são geralmente complexos devido ao impacto significativo em todos os aspectos da vida humana, bem como às diversas tecnologias implementadas para possibilitar a troca autônoma de dados entre dispositivos incorporados. O desenvolvimento da IoT tem um impacto abrangente

em vários aspectos da vida humana, como segurança, saúde, mobilidade, eficiência energética, sustentabilidade ambiental, entre outros.

Questões e desafios relacionados à IoT devem ser considerados sob diferentes perspectivas, como tecnologias habilitadoras, serviços e aplicações, modelos de negócios, impactos sociais e ambientais. Os autores observam que grande parte dos problemas em aberto surge do aumento do número de dispositivos conectados, o que gera demandas de tráfego crescentes e novos modelos de tráfego. Outras questões estão relacionadas à integração de diversas tecnologias, ambiente heterogêneo (por exemplo, diversos dispositivos, tipos de dados e tecnologias de rede), aumento das demandas de armazenamento e processamento de dados, riscos de privacidade e segurança, entre outros.

2.1.2 IoT e Redes de Sensores sem Fio

Varman et al. (2017) e Saxena e Dutta (2020) descreveram o desenvolvimento da agricultura como tendo sido impulsionado pela necessidade de aumentar a produção e eficiência. Tradicionalmente, os agricultores adotam técnicas de rotação de culturas para melhorar os rendimentos, todavia as variações climáticas tornam desafiador determinar as melhores culturas para o próximo ciclo. O crescimento das plantas depende das condições ambientais e dos parâmetros do solo. Contudo, a determinação das culturas apenas através de testes de solo ou análises meteorológicas não oferece uma visão clara.

Objetivando auxiliar os agricultores, estudos como os citados por V, R e L (2018) e Mat et al. (2016), enfatizam a importância da integração entre a qualidade do solo, condições ambientais e a previsão das culturas mais adequadas para cada campo. Países emergentes, como o Brasil, fortemente dependentes da agricultura, enfrentam problemas de gerenciamento de água, desperdiçando grandes volumes desse recurso. A irrigação eficiente e precisa é fundamental para a conservação da água nesses locais.

Os autores também relataram que uma abordagem eficiente tem sido o uso de WSN. As redes de sensores permitem a coleta de dados relevantes, como parâmetros do solo e COVs, de forma mais abrangente em áreas extensas. Com os módulos para comunicação sem fio, os parâmetros do solo, coletados por diversos nós na área

cultivada, são transmitidos para a nuvem por meio de um concentrador conectado a internet. Os dados costumam ser analisados em bancos de dados online por meio de avaliação de fluxo. Além disso, a integração com Machine Learning (ML) possibilita previsões precisas, contribuindo para a escolha da cultura mais adequada.

Outro ponto relevante tratado pelos autores é a aplicação de IoT na agricultura para o monitoramento e controle ambiental das lavouras. Através de redes WSNs, é possível monitorar condições climáticas, umidade do solo, temperatura, fertilidade do solo, detecção de ervas daninhas, crescimento das culturas, avaliação de gases, qualidade do ar e instalação de sistemas de irrigação automatizados. Esse tipo de tecnologia traz melhorias significativas na produtividade e detecção precoce de problemas, como infestação por ervas daninhas.

A aplicação de IoT e WSNs em áreas agrícolas oferece uma abordagem para gerenciar e aprimorar as práticas agrícolas, especialmente em países em desenvolvimento, onde a agricultura é uma parte essencial da economia. Essas tecnologias têm o potencial de melhorar a eficiência da agricultura, aumentando a eficácia da produção e minimizando perdas, proporcionando melhor qualidade de vida para agricultores e consumidores.

2.1.3 Importância da IoT para Agricultura

O aumento do crescimento populacional, conforme Balaji, Nathani e Santhakumar (2019), Said Mohamed et al. (2021) e Zhao et al. (2010), é acompanhado por uma demanda crescente por produção de alimentos. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), estima-se que a população mundial atinja 9,73 bilhões até 2050 e continue aumentando para 11,2 bilhões até 2100 (FAO, 2017). Essa tendência implica em desafios para a produção agrícola, incluindo a diminuição da produtividade das culturas, como a salinidade do solo em condições áridas

Além disso, os autores Li, Gu e Yuan (2016), Elhattab, Abouelmehdi e ElMoutaouakkil (2022) e Singh et al. (2021) também pontuaram o fato de que as mudanças climáticas afetam a quantidade e qualidade das safras, aumentando a sensibilidade do solo à desertificação. Nesse contexto, focar na pesquisa de recursos de terra para uso no desenvolvimento agrícola em regiões áridas é crucial. Em países em desenvolvi-

mento, o setor agrícola é um dos pilares mais importantes da renda nacional. Por isso, implementar novas tecnologias para melhorar esse setor é uma questão significativa para apoiar a economia nacional.

A produção agrícola inclui alimentos para humanos e animais, além de matérias-primas necessárias para o processo industrial. Desde tempos antigos até hoje, várias revoluções no desenvolvimento agrícola ocorreram. A primeira revolução agrícola foi realizada pelas civilizações antigas egípcia e grega, que demonstraram interesse no desenvolvimento de métodos agrícolas, com registros de sistemas de irrigação desde mais de 6000 a.C. Os egípcios e gregos desenvolveram várias máquinas agrícolas. A segunda revolução agrícola ocorreu no século XVII, seguindo o fim do feudalismo na Europa.

Posteriormente, a terceira revolução agrícola (Revolução Verde) aconteceu entre 1930 e 1960, com um aumento significativo no uso de fertilizantes minerais para aumentar a produção agrícola, juntamente com o aumento do uso de pesticidas e o desenvolvimento de várias máquinas agrícolas. Já a quarta revolução agrícola ocorreu nas últimas duas décadas, apresentando um grande avanço na tecnologia de informação e comunicação (TIC) e na inteligência artificial (IA). Essas tecnologias facilitaram o controle remoto de equipamentos e dispositivos, com uso de robôs em operações agrícolas como colheita e capina, além de drones para fertilizar colheitas e monitorar estágios de crescimento.

Agricultura IoT, segundo Suresh e Priya (2020) e Naresh e Munaswamy (2019), é a aplicação específica da tecnologia IoT na produção agrícola, operação, gestão e serviços agrícolas, utilizando vários tipos de sensores, terminais de coleta de percepção visual, entre outros equipamentos. Para os autores, as aplicações abrangem desde o plantio e cultivo até a criação de animais, a logística agrícola e outras áreas. A tecnologia IoT aplicada à agricultura oferece diversas vantagens, como monitoramento remoto e controle de recursos naturais, avaliação precisa do solo e das culturas, entre outros benefícios.

A implementação da IoT na agricultura permite aprimorar o processo de produção, monitorar e manter áreas cultivadas, promovendo um uso mais eficiente de recursos. Essa tecnologia oferece a capacidade de controlar sistemas em localizações remotas e gerenciar máquinas utilizadas na agricultura. Lakhwani et al. (2018) e Lohiya e Thakkar (2021) também pontuaram que o potencial da IoT para transformar a agricul-

tura é imenso. Com a coleta de dados de sensores inteligentes, é possível monitorar condições climáticas, o crescimento das culturas, a qualidade do solo e a saúde do gado, melhorando a eficiência e a produtividade agrícola. A Figura 1 de Farooq et al. (2020) exemplifica a diversidade das aplicações de soluções de IoT na agricultura.

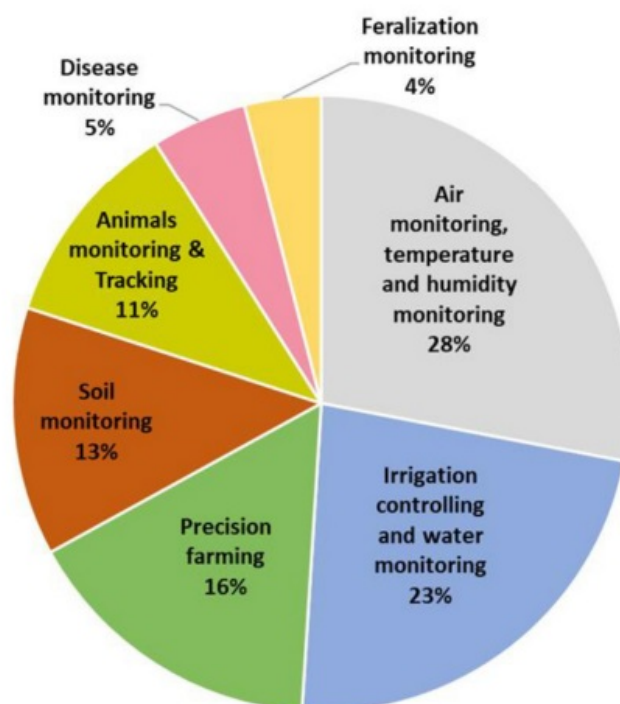


Figura 1 – Aplicações de IoT na Agricultura. Fonte: Farooq et al. (2020)

Farooq et al. (2020) realizaram uma revisão sistemática da literatura (SLR) com o objetivo principal de compilar informações sobre as tecnologias de Internet das Coisas (IoT) e sua aplicação atual em diversos domínios da agricultura. Eles revisaram artigos científicos publicados entre 2006 e 2019, totalizando 67 documentos selecionados por meio de um processo sistemático e classificados de acordo com critérios estabelecidos. A pesquisa teve como foco a coleta de estudos relevantes sobre aplicações agrícolas de IoT, sensores/dispositivos, protocolos de comunicação e tipos de redes utilizados na agricultura. E como pode-se observar no gráfico, apenas 5% dos estudos são voltados ao monitoramento de doenças e 18% dos estudos são destinados a avaliação da qualidade do ar.

A agricultura inteligente, baseada na IoT, tem o potencial de revolucionar a forma como as fazendas são monitoradas e administradas, oferecendo ganhos significativos em eficiência e rendimento. Considerando a vastidão do setor agrícola, soluções tecnológicas precisas são essenciais para garantir a sustentabilidade e minimizar o

impacto ambiental. Diante desse quadro, pesquisas voltadas a melhoria na coleta de dados sobre plantas e o ambiente agrícola são extremamente importantes para o desenvolvimento da economia nacional.

2.1.4 Sensores e Monitoramento Agrícola

O subcapítulo destina-se a apresentação do conceito de sensor destacado pelos autores: Wendling (2010), Al-Fuqaha et al. (2015), Yin et al. (2021) e Sinha e Dhana-lakshmi (2022). Bem como apresenta uma revisão acerca das aplicações de sensores e IoT na agricultura. Desse modo, os autores concentraram sensor como sendo o termo empregado na designação de componentes sensíveis a alguma forma de energia do ambiente. Para os autores, um sensor nem sempre tem características elétricas necessárias para efetuar seu uso em um sistema de controle. Além disso, o sensor pode ser tanto analógico quanto digital. Com relação aos transdutores, o autor adicionou ainda que corresponde a um dispositivo completo que apresenta o sensor como um componente. O transdutor tem a capacidade de transformar uma dada grandeza física em elétrica.

Os autores destacaram aplicações de sensores IoT para a agricultura. Adicionaram que em sistemas IoT, os sensores convertem grandezas físicas, químicas ou biológicas em outra grandeza física para processamento por sistemas eletrônicos. A diversidade de sensores varia de dispositivos simples, como de temperatura e umidade, a sistemas mais complexos, como os de imagem e som. Transdutores inteligentes são dispositivos com processadores que realizam conversão, amplificação e digitalização de sinais em um único chip, permitindo controle remoto e fornecendo informações sobre desempenho, manutenção e diagnóstico. Os autores adicionaram que transdutores encontram aplicação em processos industriais, controle de qualidade e monitoramento ambiental.

Os documentos destacaram avanços em sensores de solo e sistemas de redes de sensores na agricultura inteligente. Monitorar as condições do solo é crucial para maximizar as safras e minimizar impactos ambientais. Os sensores monitoram uma variedade de parâmetros e fornecem sinais elétricos para análise em uma rede. Para os autores, a evolução desses dispositivos revoluciona a coleta de informações e as análises conduzidas.

Said Mohamed et al. (2021) corroboraram a importância dos sensores na agricultura inteligente, destacando o monitoramento do solo, irrigação eficiente e saúde das plantas e animais. Esses dispositivos são fundamentais para análise das condições da fazenda e tomada de decisões adequadas. Os sensores comumente utilizados incluem os de umidade e temperatura do solo, entre outros. A Figura 2 ilustra os componentes de um nó sensor inteligente, conforme demonstrado por Sinha e Dhanalakshmi (2022). É possível perceber que o dispositivo é composto por uma unidade de sensoriamento; unidade de processamento dos sinais oriundos do sensor e uma unidade de transmissão dos dados. Além de possuir um elemento de fornecimento de energia.

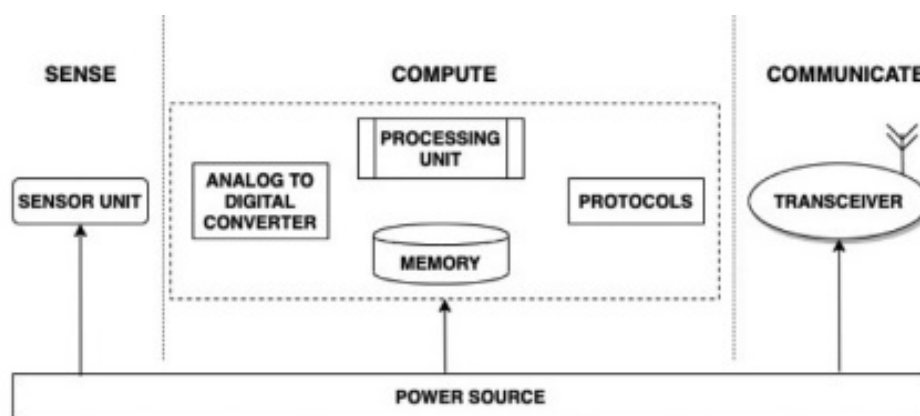


Figura 2 – Componentes de um sensor inteligente. Fonte: Sinha e Dhanalakshmi (2022)

Said Mohamed et al. (2021) apresentaram a Figura 3 contendo algumas das principais tecnologias e aplicações de sensores inteligentes voltadas a agricultura. Os experimentos práticos que guiaram os pesquisadores aos resultados descritos por este documento foram elaborados considerando protocolos WiFi (Coluna 07 da Figura 3) para transmitir dados de transdutores que podem auxiliar na melhoria do rendimento da colheita (Coluna 04 da Figura 3). O apêndice A apresenta uma lista de sensores de qualidade do ar de baixo custo dos quais, alguns foram utilizados nos experimentos descritos neste documento.

Sinha e Dhanalakshmi (2022) conceituaram mais alguns sensores voltados ao monitoramento agrícola. Dentre eles, os sensores infravermelhos passivos (PIR) são parte do detector de movimento, rastreia movimentos no campo e examina a produção das culturas convertendo variações de temperatura em tensão elétrica. Os sensores UV detectam radiação ultravioleta, influenciando características de sabor, aroma e aparência de cultivos alimentares.

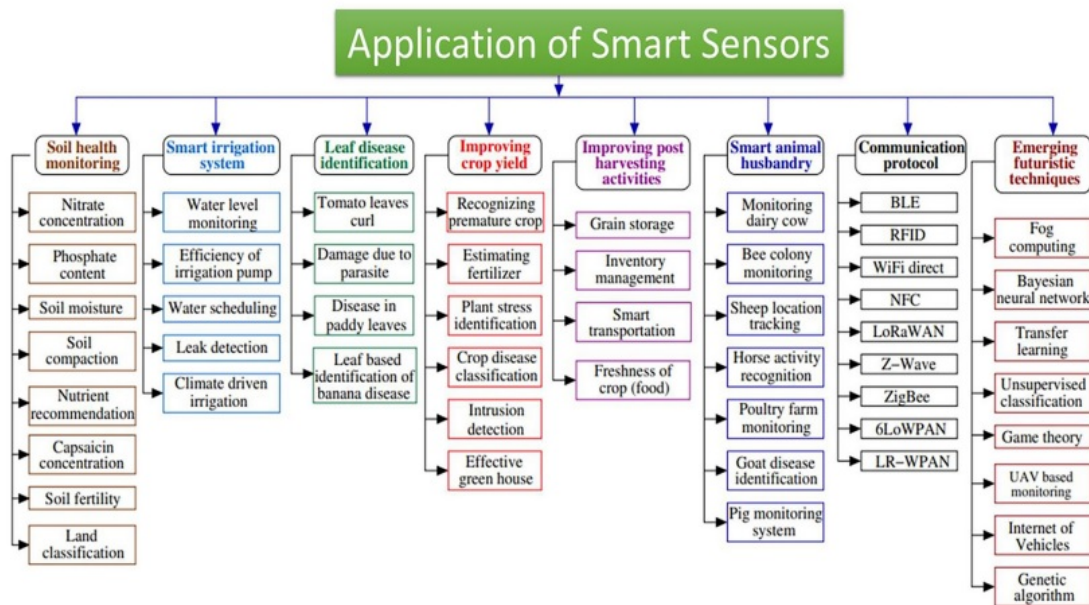


Figura 3 – Aplicação de Sensores inteligentes na agricultura. Fonte: Said Mohamed et al. (2021)

Além do PIR, o caçador de ervas daninhas como sendo uma unidade autônoma que identifica e pulveriza ervas daninhas, reduzindo o uso de herbicidas. Sensores de velocidade do vento são vitais para operações agrícolas, monitorando a velocidade e direção do vento. Os sensores de umidade do solo quantificam a água disponível e testam a sucção de água, crucial para determinar a quantidade de irrigação necessária. Sensores sem fio monitoram métodos de irrigação em estufas.

Sensores de gás detectam concentrações de gases tóxicos em terras agrícolas e auxiliam na redução de emissões de carbono e monitoram níveis de poluição. O GPS fornece dados precisos de fazendas em relação à localização. O fotodiodo identifica propriedades do solo usando luz, enquanto o tensiômetro mede a força usada pelas raízes na absorção de água. Esses sensores são classificados em subtipos na Figura 4 apresentada por Sinha e Dhanalakshmi (2022). Os experimentos de Sinha e Dhanalakshmi (2022) consideraram sensores de ambiente, medição em massa e opto-elétricos.

Yin et al. (2021) também trouxeram o conceito de sensores vestíveis para plantas. Conforme os pesquisadores argumentaram, dispositivos vestíveis, têm sido amplamente estudados em aplicações biomédicas para rastrear continuamente informações biométricas relacionadas à saúde ou condicionamento físico. Esse conceito foi estendido às plantas, permitindo o monitoramento contínuo de parâmetros fisiológicos e patológicos importantes no local, além de possibilitar a integração de comunicação e

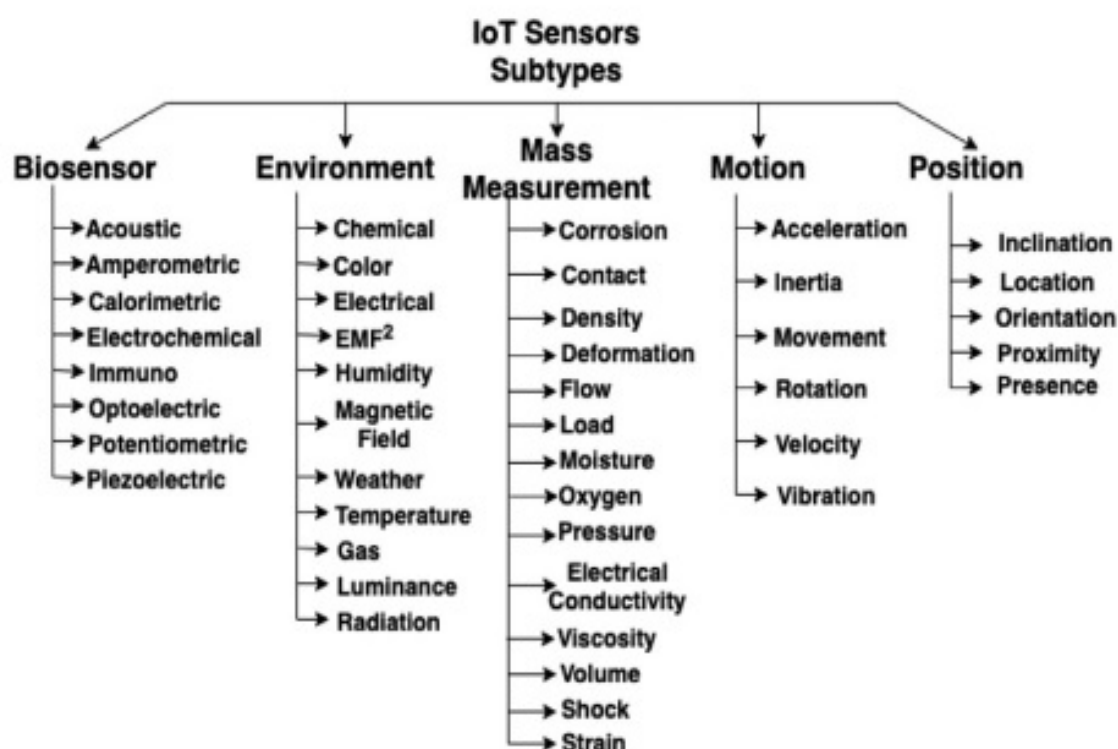


Figura 4 – Classificação de sensores IoT. Fonte: Sinha e Dhanalakshmi (2022)

controle remoto. Os *plant wearables* têm o potencial de monitorar de forma simples, precisa e contínua a saúde das plantas em grande escala, em comparação com métodos alternativos que exigem instrumentos mais complexos para análise fora do local.

Os “TFPWs” (sensores de filme fino para plantas) têm sido muito estudados por serem não invasivos e flexíveis, permitindo o monitoramento de parâmetros ambientais e biológicos importantes. Eles podem ser integrados a plantas vivas para monitorar gases tóxicos, detecção de ferimentos mecânicos e variações químicas em plantas. Outra abordagem são as microagulhas que permitem medir o fluxo de seiva, analisar sua composição e propriedades físico-químicas. Porém, esses sensores apresentam certas limitações. Por exemplo, os sensores de TFPWs não se adaptam bem a superfícies irregulares de plantas em crescimento, podendo causar danos e bloquear a detecção de informações devido ao processo de cicatrização das plantas. Além disso, é necessário investigar a consistência do desempenho desses dispositivos em condições de campo, como chuva, vento e sol.

Os autores também apresentaram que apesar dos desafios, os dispositivos vestíveis apresentam o potencial de ser uma ferramenta poderosa para rastrear informações relacionadas ao crescimento e saúde dos vegetais. Além de otimizar o cresci-

mento, resultando em um aumento na produção agrícola com menor uso de recursos.

A rede de sensores proposta como solução ao monitoramento remoto de COVs emitidos por plantas configura-se como uma rede IoT uma vez que é dotada das propriedades supracitadas. Além disso, contribui aos trabalhos supracitados por trazer uma proposta de avaliação temporal do padrão rítmico de informações de gases emitidos pelas plantas estudadas.

2.2 PROTOCOLO DE TRANSFERÊNCIA DE HIPERTEXTO

O presente item visa relatar os conceitos do protocolo de rede Protocolo de Transferência de Texto uma vez que corresponde a um dos principais protocolos de rede utilizados para elaboração de sistemas IoT e por ter sido base para o envio dos dados captados pelos sensores desenvolvidos ao longo desta pesquisa. Desse modo, o presente subcapítulo trata dos conceitos envolvendo o HTTP, suas camadas e aplicações para a agricultura.

2.2.1 Conceitos e fundamentos

Torres (2014) relatou que a internet foi fundada em 1960. Entretanto, só passou a ser popularmente conhecida após o surgimento do site que consiste em um conglomerado de documentos de hipermídia acessados por meio de um endereço conhecido como Localizador de recurso uniforme (do inglês URL). Essa transferência de documentos de hipermídia é realizada por meio do protocolo HTTP. De modo que um servidor web hospeda o site, enquanto o cliente faz a requisição dos documentos lá presentes. No lado do servidor, essa transferência é realizada por meio da porta 80 do protocolo de controle de transmissão/protocolo de internet (do inglês TCP/IP).

O TCP/IP, por sua vez, foi retratado por Stevens (1993) como um aglomerado de protocolos de comunicação de computadores em rede. O TCP/IP é subdividido em camadas onde cada camada realiza uma tarefa específica que apresenta um conjunto de serviços específicos capazes de entregar dados e informações ao protocolo da camada superior. As camadas do protocolo TCP/IP são retratadas na Figura 5. A comunicação usando o protocolo HTTP é bidirecional e tem a capacidade de permitir dois recursos para reduzir o tráfego da rede para o aumento do desempenho na

transferência de dados.



Figura 5 – Camadas TCP/IP. Fonte: Adaptado de Torres (2014)

Primeiro, o cache corresponde a cópia dos arquivos acessados no disco rígido do usuário. Isso permite que o *browser* de internet, em vez de ir ao servidor para buscar os mesmos arquivos, os procure no disco rígido do dispositivo usuário. Como vantagem, há o aumento do desempenho e diminuição do tráfego da rede. O segundo ponto retratado pelo autor deve-se ao fato do *proxy* que permite a uma máquina intermediária o funcionamento como cache.

Lohiya e Thakkar (2021) destacaram que o Protocolo HTTP emerge como uma peça fundamental para IoT aplicada à agricultura. A IoT na agricultura abrange uma variedade de dispositivos, desde sensores de solo até servidores web, desempenhando papéis vitais na coleta, transmissão e análise de dados. O HTTP, assim como protocolo de aplicação restrita (do inglês CoAP), transporte de telemetria de mensagem em filas (do inglês MQTT), protocolo extensível de mensagens e Presença (do inglês XMPP), protocolo avançado de filas de mensagens (do inglês AMQP) e serviço de distribuição de dados (do inglês DDS), é um dos principais responsáveis pela comunicação entre esses dispositivos. Um sistema de comunicação em rede é constituído por múltiplos protocolos capazes de operar em conjunto de forma a fornecer serviços distintos. A fim do protocolo HTTP seja capaz de transmitir seus dados pela Web, é preciso que o TCP/IP possibilite a conexão entre clientes e servidores através dos sockets.

2.2.1.1 Funcionamento do HTTP

Fielding et al. (1999) retrataram que o HTTP utiliza o modelo cliente-servidor, fundamentando-se no paradigma de requisição e resposta. Um software cliente estabelece conexão com um servidor e transmite uma requisição contendo o identificador uniforme de recurso (do inglês URI), a versão do protocolo, uma mensagem utilizada para codificar dados em formato de texto em código padrão americano para intercâmbio de informações (do inglês ASCII) para transmissão via Internet, com modificadores de requisição, dados sobre o cliente e o conteúdo no corpo da mensagem.

O servidor responde por meio de uma linha de status composta por sua versão do protocolo e códigos de erro, indicando se a operação foi bem-sucedida ou falhou. Em seguida, transmite dados sobre o servidor, metainformações da entidade e conteúdo no corpo da mensagem. Após o envio da resposta, a conexão estabelecida é encerrada.

2.2.1.2 Mensagem HTTP

O protocolo HTTP, conforme descrito por Fielding et al. (1999), é capaz de estabelecer a comunicação entre cliente e servidor através de mensagens. O cliente envia uma mensagem solicitando um recurso, e o servidor responde com uma mensagem contendo a solicitação.

A mensagem de requisição ou resposta é composta por uma linha inicial, nenhuma ou várias linhas de cabeçalho, uma linha em branco obrigatória que finaliza o cabeçalho e, em alguns cenários, o corpo da mensagem. O corpo é o recurso solicitado pelo cliente ou uma mensagem de erro, caso esse recurso não seja acessível. Já em uma mensagem de requisição, o corpo pode conter dados enviados diretamente pelo usuário ou um arquivo destinado ao servidor. Quando uma mensagem HTTP inclui um corpo, podem ser adicionados cabeçalhos de entidade que descrevem suas características, como o *Content-Type* e o *Content-Length*, que indica a quantidade de bytes do corpo.

A mensagem de requisição do cliente consiste em uma linha inicial, linhas de cabeçalhos, uma linha em branco e um corpo de mensagem opcional. A linha inicial contém três partes separadas por espaços: O método, o URI de requisição e a versão

do HTTP utilizada. Além disso, uma solicitação HTTP é uma maneira do navegador apresentar a página web usando um dos métodos disponíveis no protocolo HTTP. O HTTP define oito métodos de solicitação (GET, HEAD, POST, PUT, DELETE, TRACE, OPTIONS e CONNECT), cada um determina a ação a ser realizada no recurso especificado. O método GET solicita uma representação específica do recurso e deve ser usado apenas para recuperar dados, sem causar outras alterações.

O método GET tem orientações específicas publicadas pelo W3C sobre o uso apropriado para aplicações web. A requisição GET não apenas solicita um arquivo, mas também envia informações para o servidor, como o IP do cliente, a versão do navegador utilizada, a página de onde requisição HTTP foi feita e o idioma do usuário, entre outros detalhes. O método HEAD é uma variação do GET. Todavia, em vez de recuperar o recurso completo, é utilizado para obter apenas informações sobre o recurso através dos cabeçalhos da resposta. O método HEAD é empregado para obter metainformações sem a necessidade de baixar ou recuperar todo o conteúdo do recurso. O método POST é utilizado no envio de dados a um recurso especificado para serem processados pelo servidor. Geralmente, esses dados são oriundos de um formulário HTML. Diferentemente do método GET, em que os dados são anexados à URL (tornando-os visíveis ao usuário), o POST envia os dados no corpo da requisição, oferecendo maior segurança na transferência de informações. É importante incluir informações adicionais, como o tamanho, o formato dos dados enviados, e as informações submetidas que são formatadas como uma *query string* no corpo da mensagem.

O método PUT é muito parecido com POST em termos de enviar dados via corpo do HTTP. Contudo, a diferença chave está na semântica. Ao atualizar informações de um usuário, o método PUT permite atualizações repetidas, pois sobrescreve os dados existentes, mantendo um registro atualizado. O método DELETE é utilizado com o objetivo de remover um recurso, enquanto o TRACE permite ao cliente visualizar as alterações feitas nos servidores intermediários durante a requisição. O OPTIONS é o método empregado para recuperar os demais métodos HTTP aceitos pelo servidor, enquanto o CONNECT é utilizado para criar uma conexão segura.

Os códigos de estado em uma resposta HTTP representam o resultado da requisição ao cliente, dividindo-se em cinco classes (Informacional, Sucesso, Redirecionamento, Erro do Cliente e Erro do Servidor). Cada classe possui um intervalo de códigos numéricos, fornecendo informações sobre o resultado da requisição.

Ao incorporar o HTTP na camada de rede de sensores que medem as COVs por plantas, esta pesquisa adota uma abordagem abrangente e integrada. A escolha estratégica de protocolos permite uma coleta eficiente de dados, transmissão precisa para servidores ou plataformas centrais, além de simplificar a interoperabilidade entre diferentes dispositivos. A dissertação explora sobretudo como a adoção de protocolos como HTTP na infraestrutura de rede dos sensores, não apenas facilita a coleta e transmissão de dados, mas também influencia diretamente na capacidade de controle remoto e tomada de decisões baseadas em dados, contribuindo significativamente para a eficiência e melhoria dos processos agrícolas.

2.2.2 Aplicações de HTTP na agricultura

Syafarinda et al. (2018) introduziram conceitos cruciais para a agricultura de precisão, enfocando a importância do monitoramento ambiental para otimizar o crescimento das plantas em estufas. A abordagem ressalta a necessidade de considerar fatores ambientais, como temperatura, umidade e luz, que são vitais para presente projeto de pesquisa que visou a análise de COVs, uma vez que tais variáveis podem influenciar a produção desses compostos pelas plantas. Deroussi et al. (2022) propuseram um sistema de irrigação autônomo e eficiente energeticamente, resolvendo desafios comuns em sistemas de irrigação baseados em IoT. A ênfase na arquitetura energética e economicamente viável, além do uso de protocolos de comunicação como TCP e HTTP, conecta-se diretamente ao projeto de pesquisa, uma vez que a transmissão de dados sobre COVs exige eficiência energética e protocolos confiáveis para comunicação de dados.

Aydin e Aydin (2020) direcionaram o estudo para soluções baseadas em IoT, enfatizando a importância dos dados abertos na agricultura. A proposta de processamento de dados abertos e a aplicação de protocolos como o HTTP na coleta de dados ambientais em campos agrícolas é alinhada a proposta de desenvolvimento de dispositivos de sensoriamento, já que o uso de sensores IoT para análise de COVs requer a manipulação e análise eficaz desses dados. Kundu et al. (2020) desenvolveram um sistema de monitoramento de solo baseado em IoT, destacando o uso do protocolo HTTP na comunicação entre sensores e servidores na nuvem. A abordagem no monitoramento do solo, especialmente ao utilizar protocolos eficientes de comunicação, é relevante

para a elaboração de sensores IoT proposta, pois a análise dos padrões de COVs emitidos pelas plantas depende de dados precisos coletados por sensores conectados à nuvem.

Glaroudis, Iossifides e Chatzimisios (2020) conduziram uma análise detalhada dos protocolos de aplicação da Internet das Coisas (IoT) no contexto da agricultura inteligente. Os autores enfatizaram a importância desses protocolos na coleta eficaz e na transferência de dados, abordando questões-chave como latência, largura de banda, taxa de transferência, consumo de energia e preferências dos desenvolvedores. Este estudo é essencial para a proposta de desenvolvimento de sensores de baixo custo para avaliação de COVs, pois fornece informações sobre protocolos que podem ser usados na coleta de dados de voláteis, considerando a eficiência energética, confiabilidade na comunicação de dados na área da agricultura inteligente. Gagliardi et al. (2021) apresentaram uma solução de IoT para a agricultura inteligente, focando no monitoramento agrícola com ênfase na viticultura. Eles desenvolveram uma arquitetura inteligente que integra sensores IoT, drones, análise remota de dados e aplicativos web para gerenciamento e monitoramento das vinhas. Este trabalho é altamente relevante para o projeto de pesquisa proposto, já que oferece uma perspectiva prática sobre a implementação de sensores IoT em um contexto agrícola específico, mostrando como a coleta de dados pode ser realizada e analisada para otimizar operações agrícolas, algo fundamental na sua análise de COVs emitidos por plantas.

Em resumo, cada autor e seu respectivo trabalho oferecem contribuições valiosas para o seu projeto de análise de COVs emitidos por plantas por meio da utilização de sensores IoT e a necessidade de eficiência na comunicação e gestão de dados. As abordagens e tecnologias apresentadas nesses estudos podem ser aplicadas para melhorar a coleta e a análise dos dados de COVs, fornecendo informações valiosas para otimizar práticas agrícolas e entender os padrões de emissão desses compostos pelas plantas. Ao longo da elaboração dos experimentos que compuseram o escopo desta pesquisa, o uso do HTTP foi adotado para transmissão dos dados de sensores IoT para plataformas em nuvem a fim de facilitar a realização de análise estatística posterior.

2.3 REDES DE MESH

Este subcapítulo descreve o protocolo de rede de sensores Ad-Hoc, considerado na transferência das informações coletadas pelos sensores para o dispositivo raiz, utilizando o HTTP para envio dos dados à internet. Assim, aborda os conceitos, camadas e aplicações de WSN Ad-Hoc para a agricultura.

2.3.1 Conceitos e fundamentos

Cilfone et al. (2019) destacou que na atual era da quarta revolução industrial, impulsionada por tecnologias de comunicação sem fio de nova geração, a conectividade ubíqua entre objetos tornou-se uma realidade. Esse sistema de comunicação, parte integrante da chamada "rede de redes" da IoT, está projetado para permitir a interação entre humanos e bilhões de dispositivos, incluindo sensores, atuadores, serviços e outros objetos conectados. Prevê-se que até 2020, mais de 40 bilhões de "coisas" estarão conectadas por meio de tecnologias de comunicação por rádio de curto alcance, e esse número aumentará para mais de 125 bilhões até 2030.

Nesse contexto, as "coisas" conectadas são geralmente definidas como Objetos Inteligentes (SOs) e, graças à IoT, são dinamicamente integradas em vários cenários, como aplicações em indústrias inteligentes, cidades inteligentes, agricultura inteligente, saúde inteligente, entre outras. Cada área de aplicação tem requisitos específicos, o que implica considerações sobre as tecnologias de comunicação a serem utilizadas. As tecnologias sem fio relacionadas à IoT desenvolvidas nos últimos anos são extremamente heterogêneas em termos de protocolos, desempenho, confiabilidade, latência, custo efetivo e cobertura.

As topologias de rede IoT são geralmente baseadas em estrela ou árvore, com dados coletados por grupos de sensores e enviados a um coletor central ou roteador de borda para garantir o processamento centralizado. No entanto, as aplicações emergentes e em constante evolução da IoT exigem topologias de rede mais complexas, capazes de se adaptar dinamicamente a condições em mudança. Por esse motivo, há um forte interesse acadêmico e industrial no desenvolvimento de hardware e protocolos capazes de suportar Redes Mesh Sem Fio (do inglês WMNs).

Hawla et al. (2015), Expressif (2016) e Cilfone et al. (2019) realçaram que nas to-

pologias de malha, os nós da rede estão diretamente e dinamicamente conectados de maneira não hierárquica, permitindo comunicações de muitos para muitos de forma eficiente. Em uma WMN, cada nó pode atuar como host e roteador, transmitindo pacotes enviados por outros nós quando o destino não está na faixa de visibilidade da fonte. Além disso, as redes mesh não exigem uma infraestrutura fixa, pois se auto-organizam dinamicamente e se configuram, proporcionando vantagens significativas em termos de redução de custos de implantação, instalação e manutenção, distribuição dinâmica de carga, melhor reação a falhas de nós e modificação fácil na topologia da rede. A Figura 6 representa o diagrama de uma rede mesh e ilustra a relação entre os dispositivos. Os dispositivos transmitem dados e informações por meio de "saltos". Quando um dispositivo envia dados para outro que não está diretamente ao seu alcance, esses dados são encaminhados através de uma série de saltos, passando de um nó para outro até alcançar o destino desejado. Esse processo de envio e recepção de informações contribui para a escalabilidade da rede uma vez que oferece redundância e diversos caminhos para que a comunicação alcance o nó-destino.

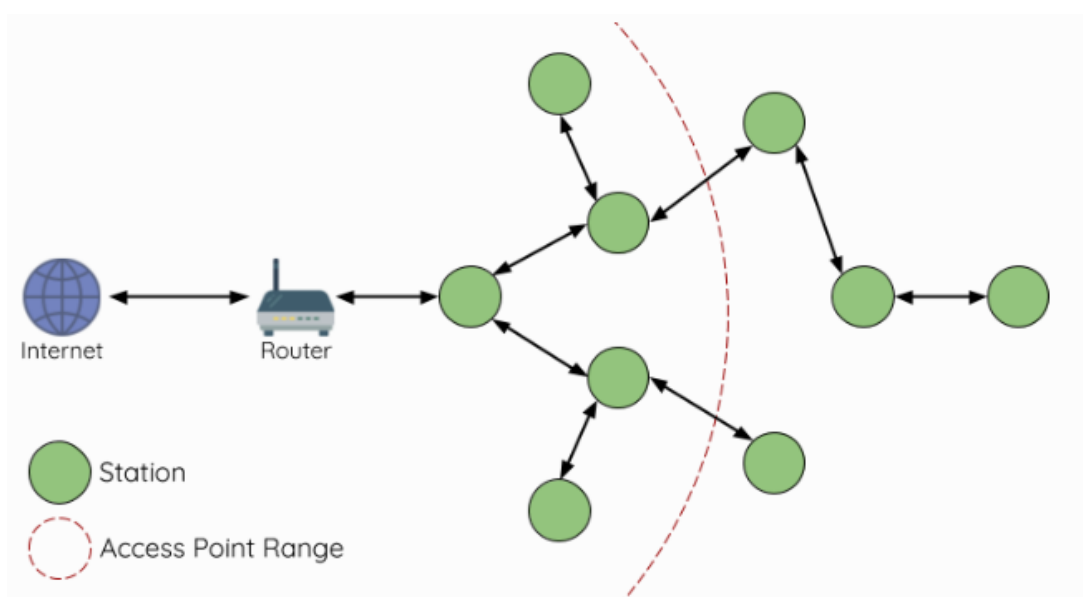


Figura 6 – Rede Mesh de Sensores. Fonte Espressif (2016)

Embora as topologias orientadas por estrela e árvore sejam bem estabelecidas e padronizadas, as redes mesh ainda carecem de padrões comuns, com a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes raramente garantida. A falta de dependência de um único nó permite que cada dispositivo participe da transmissão de informações. As redes mesh se auto-organizam e autoconfiguram dinamicamente. Esse fator é capaz de reduzir o custo inicial de instalação e de implantação em campo.

A capacidade de autoconfiguração possibilita a distribuição dinâmica de cargas de trabalho, especialmente no caso de perda de alguns nós. Isso, por sua vez, contribui para a tolerância a falhas e para a redução dos custos de manutenção.

Cilfone et al. (2019) demonstrou como uma rede mesh pode ser construída usando tecnologias de comunicação heterogêneas. Os autores forneceram uma visão abrangente de tecnologias de comunicação sem fio que podem ser empregadas em diferentes cenários da IoT, como IEEE 802.11, Bluetooth, IEEE 802.15.4 e LoRa. Analisaram esses protocolos quanto ao suporte à formação de redes mesh, seja como aplicações nativas ou por adaptação apropriada.

2.3.2 Roteamento

As redes mesh, conforme supracitado, destacam-se por sua flexibilidade e capacidade de auto-organização. Isso permite a construção de rotas de múltiplos saltos e a definição dinâmica da topologia da rede. Para realizar tais funcionalidades, é imprescindível contar com um protocolo de roteamento robusto. É válido informar que esse modelo de protocolo representa as regras e procedimentos os quais determina como os dados são transmitidos entre os nós em uma rede mesh.

Cilfone et al. (2019) introduziram os protocolos de roteamento em redes mesh como sendo frequentemente derivados de protocolos utilizados em redes ad-hoc. Estas últimas, por sua vez, classificam-se em proativas e reativas. Os protocolos proativos são *table-driven*. Isso significa que cada nó mantém tabelas de roteamento atualizadas continuamente, representando a topologia completa ou parte dela. São ideais para redes com um pequeno número de nós, um exemplo é o Protocolo de Destino Sequencial de Vetor de Distância (do inglês DSDV). Por outro lado, os protocolos reativos constroem rotas de múltiplos saltos apenas mediante solicitações específicas. Isso resulta em uma redução significativa de sobrecarga. O processo envolve três fases principais: descoberta de rota, manutenção de rota e um método incremental para limitar o número de links percorridos. Exemplos de protocolos reativos incluem o Protocolo de Roteamento Dinâmico de Origem (do inglês DSR) e o Protocolo de Roteamento de Vetor de Distância sob Demanda (do inglês AODV) em Redes Ad-hoc. Os protocolos reativos, além de suas fases distintas, caracterizam-se pelo comportamento dos nós que não geram tráfego de controle ou informações de roteamento

quando não estão ativamente envolvidos em fluxos de comunicação. Além disso, uma rota é mantida enquanto é necessária pelo nó de origem.

2.3.2.1 Protocolo de Roteamento de Vetor de Distância sob Demanda em Redes Ad-hoc

Perkins e Royer (1999) conceituou o protocolo de roteamento AODV como sendo um algoritmo notável que se destaca por sua abordagem sob demanda na aquisição de rotas em redes ad-hoc. Esta metodologia traz consigo uma série de características e processos distintos que merecem destaque. O AODV adota um sistema puramente sob demanda para a aquisição de rotas, onde os nós não mantêm informações de roteamento para caminhos inativos e não participam de trocas periódicas de tabelas de roteamento. Essa abordagem é extremamente eficaz para redes dinâmicas e altamente móveis, minimizando o sobrecarga de trocas de informações desnecessárias.

Quando um nó de origem precisa se comunicar com outro para o qual não possui informações de roteamento, é iniciado o processo de descoberta de caminho. Isso é feito por meio da transmissão de um pacote de solicitação de rota (do inglês RREQ) pela origem para seus vizinhos, contendo informações essenciais como endereço, número de sequência, identificação de transmissão, entre outros. A descoberta de caminho envolve um processo em que os nós vizinhos podem satisfazer o RREQ enviando uma resposta de rota (do inglês RREP) de volta à origem ou retransmitindo o RREQ para seus próprios vizinhos após incrementar o contador de saltos. Esse método permite o estabelecimento eficiente de rotas de comunicação para frente e reversa ao longo da rede.

À medida que o RREQ viaja pela rede, automaticamente configura o caminho reverso de todos os nós de volta à origem, facilitando a transmissão eficiente. Além disso, quando um nó ao longo do caminho possui uma rota atual para o destino, responde com um RREP, consolidando o encaminhamento do caminho para frente. Cada nó mantém uma tabela de roteamento que contém informações vitais como destino, próximo salto, número de saltos, número de sequência do destino, vizinhos ativos e tempo de expiração. Essas tabelas são constantemente atualizadas, garantindo eficiência e evitando *loops* na rede. O AODV, além de buscar eficiência de largura de banda e responsividade a mudanças na topologia, oferece um roteamento livre de *lo-*

ops em redes ad-hoc. Sua abordagem sob demanda otimiza o uso dos recursos de roteamento apenas quando necessário, otimizando significativamente o desempenho da rede.

2.3.2.2 Protocolo de Roteamento Otimizado por Estado de Enlace para Redes Ad Hoc

O protocolo de roteamento proposto por Jacquet et al. (2001) é denominado Roteamento Otimizado por Estado de Enlace (do inglês OLSR), concebido para redes móveis ad hoc (do inglês MANETs). Classificado como pró-ativo, herda a estabilidade do algoritmo de estado de link, garantindo a disponibilidade imediata de rotas quando necessário.

Uma característica fundamental do OLSR é sua otimização em relação aos protocolos puros de estado de link. Diferente de um protocolo de estado de link puro, que declara e difunde todos os links com nós vizinhos em toda a rede, o OLSR reduz o tamanho dos pacotes de controle ao declarar somente um subconjunto de links com seus vizinhos, chamados de "seletores de retransmissão multiponto". Além disso, minimiza a disseminação do tráfego de controle, utilizando apenas os nós selecionados, denominados "retransmissões multiponto", para difundir mensagens na rede. Essa abordagem reduz consideravelmente o número de retransmissões em procedimentos de disseminação ou transmissão de *broadcast*.

O OLSR mantém rotas para todas as destinações na rede, tornando-se adequado para padrões de tráfego nos quais um grande subconjunto de nós está se comunicando entre si, com os pares [origem, destino] mudando com o tempo. É particularmente eficaz em redes grandes e densas, onde a otimização usando os "retransmissões multiponto" opera de maneira eficaz.

Outro aspecto crucial do OLSR é a seleção das "retransmissões multiponto" (do inglês MPRs). Cada nó na rede escolhe um conjunto de nós em seu entorno para retransmitir seus pacotes. Os MPRs são selecionados entre os vizinhos de um nó para cobrir todos os nós que estão a duas saltos de distância. Isso é garantido ao assegurar que cada nó na vizinhança de duas saltos possua um link bidirecional com pelo menos um nó no conjunto de MPRs.

O protocolo OLSR opera de maneira distribuída, independente de uma entidade

central. Não requer transmissão confiável para suas mensagens de controle e não depende de entrega ordenada, pois cada mensagem de controle contém informações de número de sequência mais recentes.

No OLSR, o roteamento é realizado salto por salto, onde cada nó utiliza informações atualizadas para rotear um pacote. Isso permite que pacotes sejam entregues a um nó em movimento, desde que sua velocidade permita que seu movimento seja acompanhado pelos vizinhos.

Além disso, o OLSR realiza a transmissão periódica de mensagens de controle denominadas mensagens de Controle de Topologia. Estas auxiliam na construção de tabelas de topologia e roteamento em cada nó da rede.

Em termos de desempenho, o OLSR demonstra conectividade sólida, mantendo a conectividade na rede. Além disso, em relação à transmissão de *broadcast*, o OLSR garante que todos os nós recebam uma cópia da mensagem de *broadcast*, mesmo em ambientes com atrasos finitos e sem garantia de recepção correta devido a erros de transmissão.

O OLSR é especialmente projetado para operar em ambientes dinâmicos, oferecendo uma solução eficaz para roteamento em redes móveis ad hoc, sobretudo em cenários de redes grandes e densas.

2.3.2.3 Roteamento Dinâmico de Fonte para Computadores Móveis

O protocolo roteamento dinâmico de fonte para computadores móveis (do inglês DSR), conceituado por Cilfone et al. (2019), representa uma abordagem inovadora para o roteamento em redes ad hoc sem fio, oferecendo uma solução reativa e altamente eficiente para comunicação entre nós móveis. Diferenciando-se por aderir à filosofia de roteamento de origem, o DSR destaca-se pela ausência de anúncios periódicos de roteamento, reduzindo, idealmente, o tráfego de mensagens de controle para zero em situações em que todos os nós estão estacionários e as rotas para comunicação foram previamente descobertas.

A característica fundamental do DSR é sua capacidade de auto-organização e autoconfiguração, dispensando a necessidade de infraestrutura de rede preexistente. Neste contexto, os nós colaboram de maneira descentralizada para encaminhar pacotes por múltiplos saltos, ultrapassando obstáculos e possibilitando a comunicação

entre nós que não estão diretamente visíveis uns aos outros.

O protocolo opera em duas frentes principais: a Descoberta de Rota e a Manutenção de Rota. No primeiro caso, quando um nó de origem precisa enviar dados a um destino sem conhecer uma rota válida, ele emite uma solicitação de rota, e cada nó intermediário contribui indicando os saltos necessários para alcançar o destino. Já a Manutenção de Rota é acionada durante a transmissão de dados e para detectar alterações na topologia da rede. Notavelmente, o DSR faz uso eficiente de armazenamento em cache, permitindo que os nós reajam rapidamente a mudanças na topologia sem a necessidade de procedimentos frequentes de descoberta de rota.

O protocolo oferece uma alternativa robusta e de baixo sobrecarga de controle, mantendo a conectividade mesmo em ambientes dinâmicos. A capacidade de auto-configuração e a rápida adaptação a mudanças na topologia são especialmente valiosas em ambientes onde a infraestrutura de rede é limitada ou inexistente.

Dessa forma, o DSR destaca-se como uma escolha eficaz para redes ad hoc móveis, demonstrando um equilíbrio notável entre eficiência operacional, reatividade a mudanças e redução significativa de mensagens de controle, consolidando-se como uma contribuição significativa para o campo de comunicações sem fio.

2.3.3 Mesh em redes IEEE 802.11

A última década tem sido marcada por um crescente interesse em redes mesh, tanto no âmbito acadêmico quanto na indústria. Este interesse culminou na definição de uma emenda ao padrão IEEE 802.11, conhecida como IEEE 802.11s, especificamente destinada às redes mesh IEEE 802.11. Cilfone et al. (2019) destacam que essa emenda se diferencia das abordagens convencionais ao introduzir novos procedimentos de roteamento executados na camada de Controle de Acesso ao Meio (do inglês MAC), em vez da camada de rede. Deve-se, primeiro, conceituar o protocolo para que haja a explicação acerca do roteamento proposto pelos autores.

Torres (2014) conceituou o padrão IEEE 802.11 como a tecnologia mais popular para elaborar uma rede sem fio de dispositivos com capacidade de processamento. Usado sobretudo para elaboração de redes sem fio locais, o padrão faz uso de ondas de rádio para transmitir dados de um computador/dispositivo a outro. A Figura 7 representa as camadas correspondentes ao padrão IEEE 802.11.

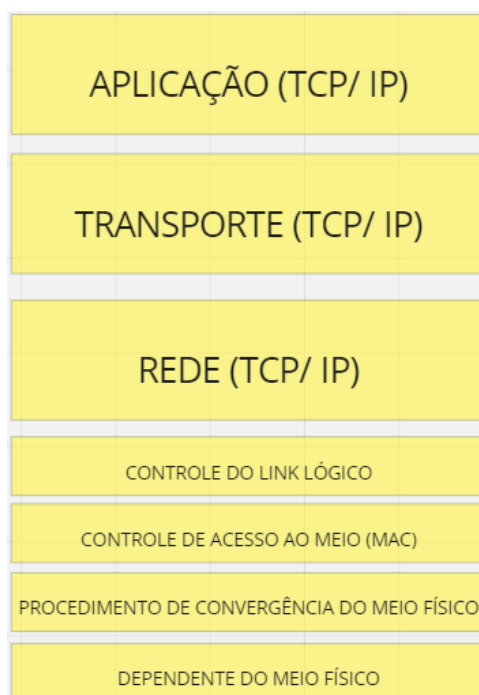


Figura 7 – Camadas do padrão IEEE 802.11. Fonte: Adaptado de Torres (2014)

O controle de link lógico retém informações acerca do protocolo de alto nível o qual o pacote de dados deve ser transmitido. O controle de acesso ao meio, por sua vez, monta o quadro de dados a ser transmitido na camada física. Já o procedimento de convergência do meio físico realiza a interface entre a camada MAC e a camada dependente do meio físico; gerando o quadro que efetivamente será transmitido. A camada dependente do meio físico transforma os sinais elétricos enviados pela MAC em ondas de rádio.

Para compreender a eficiência do roteamento proposto por Cilfone et al. (2019), é crucial que os nós tenham conhecimento preciso das conexões sem fio com seus vizinhos imediatos (1-salto). Essa estrutura lógica, referida como Conjunto Básico de Serviço de Malha (do inglês MBSS), é composta por diversos elementos, sendo os principais as estações mesh (mesh STAs). A característica principal dessa estrutura é sua simplicidade e organização auto-organizável, sem uma estrutura hierárquica, permitindo a rápida extensão da rede com a adição de um novo nó. O autor ressalta as vantagens da solução IEEE 802.11s, como implantação rápida e econômica, cobertura eficaz em cenários desafiadores e capacidade de extensão da rede.

Por outro lado, o autor reconhece desafios, como a diminuição da taxa de dados com o aumento do número de saltos e a menor confiabilidade do meio sem fio em comparação com o meio com fio. O autor argumenta que a solução de malha é pre-

ferível na perspectiva da Internet das Coisas (IoT), destacando vantagens em termos de escalabilidade, flexibilidade, custos e simplicidade de implantação para uma WMN. Isso é particularmente relevante em contextos onde uma Rede de Sensores sem Fio WSN pode se beneficiar dessas características específicas.

Em paralelo, Hjertz et al. (2010) destaca a necessidade de uma emenda ao padrão 802.11 para lidar explicitamente com as comunicações multi-salto, nas quais os dados precisam atravessar vários saltos entre estações sem fio. A emenda 802.11s não apenas aborda essa necessidade, mas também introduz o conceito de MBSS, proporcionando uma solução abrangente para a comunicação em malhas sem fio.

O 802.11s foi projetado para integrar-se de forma transparente a outras redes 802.11, criando uma única *Ethernet* virtual, possibilitando estender a cobertura das Redes Locais Sem Fio (do inglês WLANs) para diferentes ambientes. Além disso, o autor destaca a estrutura dos quadros de comunicação adaptada para acomodar as peculiaridades das redes mesh, o gerenciamento eficaz dessas redes, o controle de congestionamento e a segurança como pontos fundamentais.

O controle de congestionamento é uma inovação importante, resolvendo problemas nos limites da malha, onde as estações podem experimentar um meio sem fio ocioso. Já a segurança é uma preocupação central, com destaque para a implementação do algoritmo de Autenticação Simultânea de Iguais (do inglês SAE) como uma medida eficaz contra ataques de dicionário. Em relação à seleção de caminho na malha, enfatiza-se o esquema padrão de métrica de tempo de transmissão e o protocolo de seleção de caminho híbrido sem fio de malha (do inglês HWMP).

Por fim, Hjertz et al. (2010) apresenta implementações práticas do 802.11s, como o projeto OLPC, evidenciando desafios específicos e soluções adotadas para garantir um funcionamento eficiente em ambientes educacionais em países em desenvolvimento. Isso destaca a flexibilidade do padrão e seu suporte à interoperabilidade, tornando-se uma solução escalável e eficaz para a expansão das WLANs em diversos cenários.

2.3.3.1 Formação da topologia IEEE 802.11

A formação da topologia em uma rede baseada no IEEE 802.11s fundamenta-se na transmissão de mensagens denominadas *beacons*, que contêm informações cruciais

sobre a própria rede. Como em outros protocolos de roteamento, a primeira fase da criação da rede é a fase de descoberta, que segue dois possíveis enfoques:

- (i) Varredura passiva dos quadros de *beacons*
- (ii) Quadros de sonda de varredura ativa.

Durante o procedimento de descoberta, cada mesh STA transmite quadros de *beacons*, utilizados também para manutenção da topologia e sincronização, e responde com quadros de resposta a sondas quando um quadro de solicitação de sonda é recebido. Dessa forma, os vizinhos da mesh STA tomam conhecimento da presença de um nó mesh específico ao seu redor.

Um dos valores mais importantes transportados nos *beacons* e nos quadros de resposta a sondas é o Mesh ID, utilizado para identificar o Conjunto Básico de Serviço de Malha (do inglês Mesh BSS). Uma vez que uma estação mesh identifica o nó correto, o link é estabelecido e mantido por meio do protocolo Mesh *Peer (Link) Management* (MPM), enquanto as estações mesh estão visíveis e compartilham um perfil comum. Esse processo permite que as estações mesh construam relações de conectividade de maneira eficiente, garantindo a identificação e manutenção de links essenciais para a formação e estabilidade da topologia da rede IEEE 802.11s.

(MAN) (2016) concordaram que protocolo de gerenciamento de interconexão direta em redes mesh, conhecido como MPM, desempenha um papel crucial na criação, manutenção e encerramento de conexões entre estações mesh (mesh STAs) em ambientes onde a segurança da camada de enlace não está ativada. Quando a segurança está ativada, é utilizado o protocolo de troca de interconexão direta autenticado (do inglês AMPE).

Durante a fase de estabelecimento, ambas as mesh STAs devem enviar e receber quadros *Mesh Peering Open*, bem como confirmar a *peering* por meio de quadros *Mesh Peering Confirm*. A identificação da Mesh BSS é essencial, sendo o Mesh ID transportado nos quadros fundamental para esse propósito.

O MPM utiliza um modelo de estado enumerado para cada STA vizinha com a qual a comunicação direta é necessária. Esse estado varia conforme o protocolo de autenticação ativo e determina os tipos de quadros IEEE 802.11 que podem ser trocados entre as STAs. É importante destacar que uma STA mesh não deve transmitir quadros

além dos usados para a descoberta de *peers*, MPM e SAE a uma STA mesh vizinha até que um *peering* mesh tenha sido estabelecido.

Para criar uma interconexão direta segura, as mesh STAs autenticam uma à outra e estabelecem uma associação de segurança de chave mestra par-a-par (do inglês PMKSA) mesh. Isso pode ser feito usando Autenticação Simultânea de Iguais (SAE) ou IEEE Std 802.1X. O protocolo SAE é iniciado pela STA mesh de varredura em direção à STA mesh candidata. Se o SAE não for bem-sucedido, o procedimento de estabelecimento da interconexão é encerrado. Caso contrário, o PMK resultante da autenticação bem-sucedida é utilizado para criar um PMKSA mesh.

O MPM utiliza um controlador de instância de interconexão para gerenciar todas as instâncias mesh. Esse controlador é responsável por criar e excluir máquinas de estado finito MPM e AMPE, gerenciar identificadores de instância e tratar quadros de gerenciamento de interconexões. A criação de uma nova instância de interconexão ocorre após a recepção de um quadro aberto. Uma instância é identificada por identificador local, mac local e mascara de interconexão. A exclusão de instâncias ocorre por meio de expiração de um temporizador, aceitação da resposta de um pareamento para fechar a autenticação. O protocolo MPM, ao processar quadros de gerenciamento de interconexões de mesh, determina se uma nova instância deve ser criada ou se uma instância existente deve ser atualizada. A segurança é considerada, e o conteúdo do quadro é verificado para garantir consistência com a configuração da STA mesh. Em suma, o protocolo MPM desempenha um papel fundamental na criação e manutenção de conexões de *peering* em redes mesh IEEE 802.11s, garantindo uma comunicação eficiente e segura entre mesh STAs.

2.3.3.2 Protocolo Sem Fio Híbrido Mesh

Cilfone et al. (2019) apresentaram uma análise detalhada do protocolo sem fio híbrido mesh HWMP como sendo o protocolo padrão de roteamento para redes IEEE 802.11s. Destacaram que, embora o HWMP seja designado como padrão pela norma IEEE 802.11s, a flexibilidade da norma permite a substituição por outros algoritmos, se necessário. O HWMP oferece opções de seleção de caminho proativo e reativo, baseando-se no protocolo AODV adaptado para suportar roteamento na camada MAC. Especificaram que a fase de descoberta de rota varia conforme o modo operacional,

seja sob demanda, onde a rede é inundada com mensagens RREQ, ou proativamente, por meio do envio periódico de mensagens RREQ ou mensagens do tipo anúncio de raiz (do inglês RANN). Essa natureza híbrida do HWMP, combinando abordagens proativas e reativas, proporciona um roteamento eficiente em redes mesh sem fio.

Bari, Anwar e Masud (2012) complementaram essa análise ao abordar o contexto mais amplo das WMNs. Apresentaram as WMNs como uma solução robusta para superar as limitações das redes sem fio tradicionais, destacando sua aplicação em diversos cenários, desde redes comunitárias até acesso à internet de última milha. Reforçaram a versatilidade das WMNs, ilustrando sua estrutura e destacando a importância dos Pontos de Acesso Mesh (do inglês MAP), Pontos Mesh (do inglês MP), e Pontos de Portal Mesh (do inglês MPPs) na formação e conectividade dessas redes. Além disso, ressaltaram o papel crucial das WMNs em superar as limitações das redes sem fio tradicionais, oferecendo uma solução promissora que suporta conceitos de malha sem fio.

Ambos os estudos reconhecem a importância do IEEE 802.11s ao estabelecer o HWMP como protocolo de roteamento padrão na camada MAC e o tempo de transmissão como métrica de roteamento padrão. Enquanto Cilfone et al. focaram na estrutura e funcionamento do HWMP, destacando sua flexibilidade e eficiência na descoberta de rotas em redes mesh sem fio, Bari et al. contextualizaram essa análise, evidenciando a amplitude de aplicação das WMNs e a necessidade de superar as limitações das redes sem fio tradicionais.

Em conjunto, esses estudos fornecem informações importantes para o entendimento acerca do Protocolo Híbrido sem fio Mesh (HWMP) e sua aplicação em Redes Mesh Sem Fio, contribuindo significativamente para o entendimento e avanço nesse campo.

2.3.4 Aplicações de redes mesh na agricultura

Os artigos forneceram uma visão abrangente sobre a aplicação das redes de malha sem fio, incluindo contextos relevantes para a Agricultura de Precisão (PA). Cilfone et al. (2019) destacaram o potencial das tecnologias de comunicação sem fio, desde padrões estabelecidos, como IEEE 802.11, Bluetooth, IEEE 802.15.4, até tecnologias emergentes, como LoRa baseado em Sub-GHz, para redes orientadas por malha. No

contexto do projeto de pesquisa, a aplicação dessas tecnologias seria fundamental para estabelecer uma rede de sensores capaz de coletar dados sobre emissões de COVs por plantas do tipo Arruda em uma estufa. Essas tecnologias poderiam viabilizar a comunicação entre os sensores de forma eficiente e a transmissão dos dados coletados para análise.

Anurag, Roy e Bandyopadhyay (2008) propuseram uma rede de sensores sem fio para Agricultura de Precisão (do inglês PA), ressaltando a relevância dos sensores na coleta de dados climatológicos e ambientais em tempo real para otimização dos rendimentos e controle de qualidade. No projeto de pesquisa, a ênfase nos sensores seria semelhante, já que a detecção das emissões de COVs pelas plantas de Arruda em tempo real é crucial para compreender seus padrões de emissão e seu impacto no ambiente da estufa.

Stewart, Stewart e Kennedy (2017) e Brun-Laguna et al. (2018) conduziram estudos de caso em Agricultura de Precisão e Edifícios Inteligentes, respectivamente, utilizando tecnologia *Smart Mesh IP*. Ambos realçaram a confiabilidade e eficiência dessa tecnologia em ambientes desafiadores, enfatizando a estabilidade da rede e a simetria das ligações sem fio. Esses estudos oferecem conceitos fundamentais para implementar uma rede de sensores na estufa, garantindo uma comunicação estável e eficiente entre os dispositivos sensoriais que monitoram as emissões de COVs pelas plantas de Arruda.

Sales et al. (2020) exploraram o consumo de energia em redes IoT para Agricultura de Precisão, com foco no Protocolo de Roteamento para Redes com Perda de Baixa Potência (do inglês RPL). Suas simulações destacaram que a topologia circular foi mais eficiente em termos de consumo de energia, evidenciando a importância do gerenciamento da topologia em redes de baixa potência. Esse conhecimento pode ser aplicado para otimizar a eficiência energética na rede de sensores proposta ao longo da pesquisa; considerando estratégias de topologia que minimizem o consumo de energia enquanto monitoram continuamente as emissões de COVs pelas plantas de Arruda.

Esses estudos fornecem um embasamento sólido para a implementação de redes de sensores em ambientes específicos, como a estufa com plantas de Arruda, enfatizando a necessidade de escolher tecnologias, protocolos de roteamento e topologias de rede adequados para garantir a eficiência, confiabilidade e otimização do consumo

de energia nessas aplicações específicas de IoT.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, elaborou-se uma rede mesh de sensores inteligentes, capazes de captar sinais de temperatura, umidade, pressão atmosférica, COVs, H₂, Etanol e CO₂ emitidos por plantas a fim de servir de meio para coleta de dados dos vegetais em ambientes de campo aberto. Deste modo, experimentos iniciais foram feitos em uma estufa presente no laboratório do Centro de Informática da UFPE. O projeto envolveu a rede mesh cuja topologia árvore com roteamento AODV apresenta um único nó-raiz capaz de receber dados dos demais nós e enviar à nuvem por meio de uma rede WiFi 2.4 GHz por meio do protocolo HTTP.

2.4 TÉCNICAS MATEMÁTICAS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS

A busca por resultados referentes aos experimentos relatados passou por realizar uma série de análises estatísticas e técnicas matemáticas acerca dos dados coletados. Tais avaliações são descritas abaixo.

2.4.1 Média

Cazorla (2000), Monteiro (2009) e Morettin (2010) conceituaram a média como um parâmetro que corresponde a um elemento matemático que consiste em uma relação entre uma amostra completa de elementos e um dado elemento específico. Segundo a autora, a média é parte do cotidiano dos cidadãos, através da utilização na mídia de informações estatísticas. A média aritmética corresponde a um conceito fundamental da Estatística. Sendo amplamente utilizada no cotidiano das pessoas. Na academia, a maioria dos dados relatados por pesquisadores utilizam a média.

Os autores trouxeram a abordagem de dois conceitos fundamentais de média: o primeiro foi relacionado à divisão por partilha, onde a média é calculada como se todos os dados fossem iguais, seguindo um algoritmo simples de soma e divisão pelo número total. O segundo conceito de média é abordado como um ponto de equilíbrio, considerando não apenas os valores, mas também seu peso e a distância em relação à média. Para a autora, a média é concebida como um ponto de equilíbrio em uma linha numérica, considerando frequências absolutas e a distância em relação à média. O texto destaca a ideia de equilibrar os valores ao redor da média, criando um modelo

visualmente sugestivo. A média pode ser entendida como redução de dados, divisão em partes iguais, valor típico de “sinal e ruído”.

A média aritmética apresenta uma importância fundamental para o cálculo de outras medidas, como, por exemplo, a variância, o desvio padrão, o coeficiente de variação, de correlação dentre outras. Sua formulação matemática é realizada por meio do processo de somar todos os valores da variável e dividir pelo número de observações presentes na soma. A média apresenta as seguintes propriedades:

1. A média se localiza entre os valores ($\text{mínimo} \leq \text{média} \leq \text{máximo}$);
2. A soma dos valores a partir da média é zero ($\sum (X_i - \text{média}) = 0$);
3. A média sofre influência de todos os valores ($\text{média} = \sum X_i / n$);
4. A média não precisa ser igual a algum dos valores amostrados;
5. A média pode ser uma fração;
6. O cálculo da média leva em consideração todos os valores (além dos nulos e negativos);
7. A média é aquela que está mais próxima de todos os valores.

A média faz parte da Análise Exploratória dos Dados de uma amostra, sendo uma medida central que resume a tendência central dos dados. Sua equação é dada por:

$$\text{Média}(\bar{X}) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Desse modo, fez-se uso da média aritmética para avaliar de forma geral o comportamento dos índices de emissões de COVs, temperatura, pressão, umidade, índices de H₂ e Etanol que agiram sob um ecossistema aberto e em estufa contendo uma planta do tipo arruda. Com base nas informações coletadas, foi possível entender a existência do ciclo circadiano supracitado; bem como perceber o quanto as variações nessas variáveis afetam o vegetal.

A arruda foi escolhida como foco dos experimentos uma vez que, além do odor forte, não é exigente em termos de clima e formas de cultivo, é facilmente encontrada e comercializada na região onde a pesquisa foi realizada e porque é usada para fins medicinais como tratamento contra inflamação nos olhos.

2.4.2 Matriz de Correlação

A Matriz de Correlação de Pearson, conforme apresentaram Lidiane et al. (2018), Araujo, Santos e Gomes (2019), Rocha (2018) e Guimarães (2021) corresponde uma metodologia gráfica estatística usada para avaliar dados históricos e um universo estudado; identificando visualmente os parâmetros envolvidos no estudo que se relacionam entre si. O Coeficiente de Pearson é o fator utilizado para mensurar o grau de relação entre duas variáveis. Esse fator corresponde a um número adimensional que varia entre -1 e 1. Esse coeficiente apresenta o grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Quando negativa indica que uma variável diminui com o aumento da outra, e positiva quando uma variável aumenta com o aumento da outra. O Coeficiente de Correlação de Pearson, conhecido como "coeficiente de correlação produto-momento" ou simplesmente " ρ de Pearson" corresponde a um teste estatístico que observa o grau de intensidade e o sentido da relação entre variáveis. Este coeficiente tem a capacidade de assumir apenas valores entre -1 e 1.

A correlação indica a relação de interdependência entre duas variáveis. Já o cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson serve para detectar o nível de correlação entre parâmetros distintos quando não se é facilmente compreendida a interdependência. Existem diversas possibilidades de interpretação do grau de relação apresentado pela Matriz. Pode-se considerar a inclinação da reta que representa a interação entre as variáveis, ou a coleção de valores como vetores, e o ρ , geometricamente, representaria o cosseno do ângulo formado entre os vetores.

A matriz de correlação também pode ser introduzida como sendo uma representação tabular que contém coeficientes de correlação entre diferentes variáveis de um conjunto de dados. Essa matriz é frequentemente utilizada na análise de dados para identificar associações entre variáveis. Cada célula na matriz indica a relação de correlação entre duas variáveis específicas. A correlação refere-se a qualquer tipo de associação estatística entre variáveis. Todavia, considera-se que a correlação está vinculada à proximidade de duas variáveis em ter uma relação linear, o que é conhecido como correlação de Pearson. Exemplos cotidianos de fenômenos dependentes incluem a correlação entre a altura dos pais e a altura de seus filhos, bem como a correlação entre a demanda por um produto de oferta limitada e seu preço.

O coeficiente de correlação varia entre -1 e 1 e é comumente representado pela

letra "r". A correlação positiva ($r > 0$) representa variáveis que se movem na mesma direção. A correlação nula ou zero significa que não há relação perceptível entre as variáveis. Já a correlação negativa ($r < 0$) aponta que as variáveis se movem em direções opostas. Em outras palavras, quando o valor de uma variável aumenta, o valor da outra diminui. A matriz de correlação permite identificar essas relações entre variáveis, facilitando a análise e interpretação dos dados.

A matriz de correlação corresponde a uma ferramenta utilizada na análise de dados para descrever a associação entre variáveis. Essa ferramenta estatística tem a capacidade de medir o grau de dependência entre as variáveis e permite entender o quanto uma variável influencia outra. Essa relação de dependência pode ser causal ou não. A análise de correlação apresenta a capacidade de resultar em três cenários: correlação positiva, correlação negativa ou ausência de correlação. A correlação positiva ocorre quando duas variáveis crescem ou decrescem juntas, demonstrando uma relação direta. A correlação negativa, por outro lado, acontece quando uma variável cresce enquanto a outra decresce, ou vice-versa. A ausência de correlação ocorre quando o crescimento ou decréscimo de uma variável não afeta a outra. O coeficiente de Pearson é capaz de indicar a direção positiva ou negativa da correlação. Os valores que o coeficiente de Pearson (p) pode assumir as seguintes interpretações:

- p entre 0,9 e 1 (positivo ou negativo): correlação muito forte;
- p entre 0,7 e 0,9 (positivo ou negativo): correlação forte;
- p entre 0,5 e 0,7 (positivo ou negativo): correlação moderada;
- p entre 0,3 e 0,5 (positivo ou negativo): correlação fraca;
- p entre 0 e 0,3 (positivo ou negativo): ausência de correlação.

De forma a verificar o grau de relação e entender o que acontece com os parâmetros experimentados conforme mudanças climáticas ocorrem, fez-se necessário elaborar matrizes de correlação que utilizou cores (vermelho, amarelo e azul) para representar o grau e o sentido da correlação entre variáveis. Esse grau foi calculado por meio do Coeficiente de Pearson.

2.4.3 Análise de Fourier

Joseph Fourier, segundo informaram Silva e Pinheiro (2012) e Lathi e Parma (2004), elaborou uma teoria de análise de frequência; onde afirmou que qualquer sinal periódico pode ser representado por uma somatória de senos e cossenos, ou seja, uma série infinita que ficou denominada de Séries de Fourier. A Análise de Fourier corresponde a um conjunto de técnicas matemáticas voltadas a decompor funções complexas em componentes sinusoidais, como senos e cossenos. Além do papel na representação e análise de sinais e sistemas, é preciso considerar a convergência da Série de Fourier, que avalia cenários em que a série converge para a função original e fenômenos como a oscilação de Gibbs. A série abaixo representa funções periódicas como somas ponderadas dessas componentes, e sua formulação geral é dada por:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$$

onde $f(t)$ é a função periódica, ω é a frequência angular, e a_n e b_n são coeficientes que determinam amplitudes e fases.

Na análise de sinais digitais (como os observados ao longo dos experimentos desta pesquisa), a Transformada Discreta de Fourier (do inglês DFT) desempenha um papel central. Para uma sequência discreta $x[n]$ de comprimento N , a DFT é dada por:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

Os autores ainda indicam questões referentes ao Janelamento. Corresponde a uma técnica utilizada na análise de sinais para mitigar o vazamento espectral que pode ocorrer ao aplicar a Transformada de Fourier ou a DFT a sinais que não são infinitos em duração ou que não possuem um número inteiro de ciclos completos. O vazamento espectral refere-se ao fenômeno em que a energia de um sinal se espalha por várias frequências, tornando mais difícil identificar as frequências exatas presentes no sinal.

Explorar diferentes funções de janelamento ao aplicar a DFT é essencial, pois isso pode afetar a análise espectral. Considere também as limitações das técnicas de Fourier, como a necessidade de periodicidade na Série de Fourier e as considerações relacionadas à discretização em DFT e FFT.

Além disso, é crucial discutir a relação entre DFT e Fast Fourier Transform (FFT). A FFT corresponde a um algoritmo eficiente para calcular a DFT, reduzindo a complexidade computacional de $O(N^2)$ para $O(N \log N)$. A aplicação prática da FFT é ampla, especialmente em processamento digital de sinais, onde é usada para análise espectral rápida de sinais discretos. Ao observar tais ferramentas, é considerável a análise de frequência e o domínio do tempo. Entender a relação entre esses domínios fornece informações sobre as componentes de frequência presentes em um sinal.

Propriedades Matemáticas:

- *Linearidade:* As transformadas de Fourier são lineares, ou seja, a transformada de uma combinação linear de sinais é a combinação linear das transformadas individuais.

Se $F\{a \cdot f(t) + b \cdot g(t)\} = a \cdot F\{f(t)\} + b \cdot F\{g(t)\}$, então a transformada de Fourier é linear, onde a e b são constantes;

- *Deslocamento no Tempo:* O deslocamento no tempo de uma função resulta em uma fase multiplicativa na transformada de Fourier.

Se $F\{f(t - \tau)\} = e^{-j\omega\tau} \cdot F\{f(t)\}$, então o deslocamento no tempo de uma função resulta em uma fase multiplicativa na transformada de Fourier;

- *Modulação em Frequência:* A multiplicação de uma função por uma onda senoidal no domínio do tempo resulta em um deslocamento na frequência na transformada de Fourier.

Se $F\{e^{j\omega_0 t} \cdot f(t)\} = F\{f(t)\}(\omega - \omega_0)$, então a multiplicação de uma função por uma onda senoidal no domínio do tempo resulta em um deslocamento na frequência na transformada de Fourier.

Em resumo, a Análise de Fourier oferece uma abordagem fundamental para entender e representar sinais complexos, como as avaliações temporais de CO2 e COV emitidos por plantas. A Série de Fourier, a DFT e a FFT são técnicas específicas que aplicam esses princípios em contextos específicos. Ao estudar essas ferramentas, é preciso considerar a convergência da série, escolher funções de janelamento adequadas, compreender as limitações das técnicas de Fourier, explorar a relação entre DFT e FFT, analisar frequências e entender as propriedades matemáticas.

2.5 RESUMO DO CAPÍTULO

O presente capítulo foi elaborado com o objetivo de introduzir os conceitos técnicos, teóricos e práticos fundamentais que serviram como alicerce para a construção da proposta de desenvolvimento de uma rede de sensores IoT descentralizada, mesh capaz de ler e processar informações acerca de voláteis emitidos por plantas do tipo Arruda. O capítulo conduziu o leitor a uma explicação acerca do IoT e sua importância para a agricultura; destacando métodos de classificação das aplicações da tecnologia. Além disso, o capítulo trouxe os principais conceitos acerca dos protocolos de rede mesh, para desenvolvimento de malhas de sensores sem fio, e HTTP; para desenvolvimento de sistemas com comunicação com a internet. Estes protocolos de comunicação tiveram extrema importância para a pesquisa descrita por este documento uma vez que contribuíram fortemente para permitir o desenvolvimento de uma rede de sensores IoT capaz de medir e avaliar sinais de COVs emitidos por plantas.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

O presente capítulo foi elaborado buscando descrever de maneira resumida os trabalhos que serviram de alicerce a construção das bases teóricas e práticas que sustentam os pontos abordados pela dissertação. Os trabalhos relacionados estão divididos em: O papel dos COVs na comunicação das plantas; Os processos tradicionais para coleta e análise de COVs; Sensores eletrônicos que são atualmente utilizados para coletar dados sobre COVs.

3.1 O PAPEL DOS COVS NA COMUNICAÇÃO DAS PLANTAS

O presente item desta seção traz o conjunto de referenciais teóricos mais recentes que apresentam os conceitos envolvendo a comunicação dos vegetais por meio da emissão de COVs. Dentro deste cenário, Bouwmeester et al. (2019) relatou que através de COVs, as plantas estão em diálogo constante com os organismos ao seu redor. Para os autores, essa comunicação é de grande importância uma vez que permite a interação entre plantas e os demais organismos de forma a sintonizarem seu crescimento, desenvolvimento e defesa de forma a atingir o condicionamento físico máximo.

As plantas e os organismos ao seu redor produzem COVs que pertencem a diversas classes químicas, como os terpenóides, os benzenóides e os fenilpropanóides, moléculas derivadas de ácidos graxos, incluindo os voláteis da folha verde (GLVs) e classes menores, como nitrilas, (ald) oximas e sulfetos. Os COVs emitidos pelas plantas terem papel crucial na atração de insetos mutualistas e polinizadores. Todavia, esses voláteis também atraem insetos herbívoros capazes de usar COVs para identificar e atuar negativamente contra a saúde das plantas. O sistema olfativo das antenas dos insetos pode discriminar padrões e usar esse artifício para determinar a relevância biológica, adequação ou inadequação do hospedeiro ao seu ciclo de vida.

Os voláteis de plantas induzidos por herbívoros (do inglês HIPVs) como sendo gases nos quais as plantas emitem de forma a atrair insetos "inimigos" daqueles que se alimentam do vegetal. Os HIPVs são misturas de gases - principalmente os voláteis de folhas verdes (do inglês GLVs), terpenos e compostos aromáticos – que uma

planta produz em resposta à atuação desses insetos. Os HIPVs são liberados após a ruptura do tecido; no entanto, embora em níveis baixos, alguns também são emitidos constitutivamente no *headspace* das plantas.

Não só as plantas são capazes de emitirem COVs; mas também os organismos que vivem ao seu redor são capazes de emitir voláteis capazes de alterar a fisiologia e o metabolismo das plantas. Alguns organismos, por exemplo, podem estimular o crescimento de raízes através da produção de voláteis como 3-hidroxi-2-butanona (acetoína), 2,3-butanodiol e 2-entilfurano. Outros podem induzir resistência e tolerância em plantas como acetoína, dissulfeto de dimetil, 3-pentanol e 6-pentil-a-pirona. Esses fatores mostram que as plantas não só produzem voláteis, mas também percebem e respondem a eles.

Os HIPVs podem inibir o crescimento microbiano e atuar como agentes bacteriostáticos locais. Outro exemplo de defesa são os Indóis e GLVs que podem afetar a integridade da membrana de bactérias na superfície da planta e interferem com a detecção de quorum bacteriano, desregulando assim a virulência bacteriana. Os COVs são importante meio de comunicação entre plantas vizinhas ao afirmar que em resposta ao ataque de patógenos, as plantas não apenas ativam sua própria resposta de defesa, mas a infecção também pode induzir a emissão de voláteis no espaço livre. Isso pode levar a uma resposta imune em plantas vizinhas. A Figura 8, retirada do artigo detalhado nesta seção apresenta-se como uma síntese dos pontos relatados pelos autores.

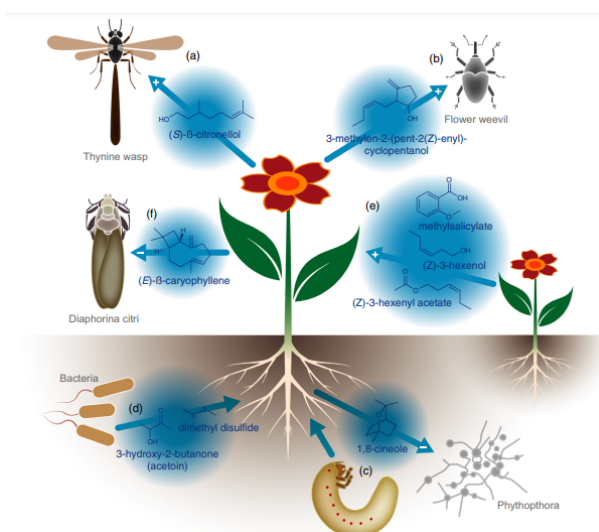


Figura 8 – Diagrama do ciclo de VOCs. Fonte: Glaroudis, Iossifides e Chatzimisios (2020)

Bouwmeester et al. (2019) aprofundaram as informações sobre a comunicação en-

tre plantas ao informar que quando atacados por artrópodes herbívoros, as plantas geralmente emitem uma mistura diferente de voláteis, tanto qualitativa quanto quantitativamente, e essa mistura de voláteis pode iniciar respostas em folhas e plantas vizinhas. Como tal, as plantas também são indicadas como indivíduos com um certo dialeto. Essa comunicação pode fazer com que as plantas vizinhas iniciem um processo de fortalecimento das defesas contra as pragas antes destas as atingirem. COVs são importantes para a agricultura uma vez que pode-se utilizar COVs na identificação e subsequente aplicação de micróbios no campo que aumentam a atratividade das flores para os insetos polinizadores. Neste sentido, o estudo destacado por esta dissertação visou amplificar as avaliações de Bouwmeester et al. (2019) trazendo alternativas para facilitar a avaliação da interação planta-inseto por meio de uma malha de sensores capazes de mensurar COVs. O presente documento de dissertação de mestrado tem como um dos objetivos descrever o desenvolvimento de uma rede de sensores eletrônicos cuja capacidade de detectar assinatura desses gases emitidos por plantas foi testada nos experimentos detalhados na seção de resultados.

Riedlmeier et al. (2017) complementaram Bouwmeester et al. (2019) ao terem apresentado um estudo acerca do papel de compostos orgânicos voláteis na resistência sistêmica adquirida (do inglês SAR). Segundo os autores, as plantas são equipadas com um sofisticado sistema imunológico multicamadas que tem os COVs como alicerce. A resistência não-hospedeira é a forma mais robusta de resistência das plantas a micróbios. Se um patógeno adaptado ao hospedeiro pode penetrar barreiras constitutivas da superfície e da parede celular da planta, por onde acessa o espaço extracelular. Como mecanismo de defesa, padrões receptores de reconhecimento (do inglês PRRs) podem identificar estruturas de micro organismos eliciadores ou padrões moleculares associados a patógenos. Há indicações de que COVs derivados de outras plantas, bactérias ou fungos podem afetar imunidade do vegetal. Dessa forma, composição de uma malha de sensores capazes de medir índices de COVs tem grande utilidade no aumento da eficiência da avaliação da imunidade das plantas.

O estudo dos autores supracitados também explorou a capacidade de comunicação das plantas por meio de COVs ao apresentar uma análise sobre quatro possíveis explicações não exclusivas envolvendo o papel dos compostos orgânicos voláteis: Como sinais internos de defesa da planta; Como características que interagem sinergicamente com outras defesas e como pistas entre parentes. Heil e Karban (2010) re-

lataram que os primeiros estudos acerca do tema supracitado apareceram em meados de 1980. Em 1983, estudiosos perceberam que uma espécie de salgueiro crescendo perto de uma área infestada de herbívoros coespecíficos apresentou níveis mais elevados de resistência a herbívoros do que as plantas que cresciam em outras regiões.

Uma interação em que as plantas aumentam aptidão de seus vizinhos sem melhorar a sua própria aptidão resulta em uma desvantagem evolutiva para o emissor e, portanto, representa "escuta" em vez de uma verdadeira comunicação. Os autores perceberam que existe um fenômeno onde COVs liberados por plantas que expressam resistência podem desencadear defesas específicas e respostas em plantas vizinhas de diferentes espécies. A maioria dos fatores fisiológicos e genéticos subjacentes são mecanismos que ainda precisam ser descobertos, mas vários estudos demonstraram que as plantas que crescem na natureza podem se beneficiar de uma expressão de resistência mediada por COV. Vários experimentos de campo conduzidos durante a década de 1990 indicaram que a espécie de planta amieiro (*Alnus glutinosa*) e exemplares de tabaco silvestre (*Nicotiana attenuata*) sofreram menos danos naturais por herbívoros do que quando cultivadas em estreita proximidade com plantas vizinhas cortadas experimentalmente, que eram outros amieiros no primeiro caso e artemísia (*Artemisia tridentata*) no segundo caso. Além disso, as plantas de cevada (*Hordeum vulgare*) tornaram-se menos atraente para pulgões após a exposição ao ar de várias espécies de cardo (*Cirsium*); um efeito que pode proteger cevada em condições de campo.

Os autores trouxeram outros exemplos de comunicação entre plantas onde o aumento considerado da resistência a pragas foi observado apenas do lado da planta receptora. No entanto, plantas parasitas e insetos herbívoros podem usar COVs para localizar seus hospedeiros, causando assim supostamente alto custos de liberação de COV no emissor. De maneira sintética, os autores trouxeram a hipótese de que a percepção de pistas aéreas geralmente beneficia o receptor, enquanto sua liberação incorre em um custo metabólico para o emissor e pode causar custos ainda maiores quando herbívoros ou parasitas as plantas usam esses COVs como pistas de localização de hospedeiros. Dessa forma, a malha de sensores descrita por este documento pode contribuir para aprofundar o estudo acerca da comunicação entre plantas elaborado por Heil e Karban (2010).

Tungadi et al. (2017) adicionaram informações ao tema proposto quando apresen-

taram o relato de estudos que avaliaram a ação de pulgões em plantas de abóboras (não muito atraentes a pulgões). Os autores relataram que plantas de abóbora infectadas com um vírus (strain Fny) se tornaram mais atraentes para pulgões e isso foi relacionado com aumentos na quantidade de partículas de COVs liberados por plantas infectadas. Os autores observaram que o aumento da emissão de COV atua como um sinal semioquímico enganoso para atrair pulgões para plantas infectadas. Mudanças na composição dos COVs, em detrimento da quantidade de COVs emitidos, é tipicamente mais importante na determinação de mudanças nas respostas comportamentais das plantas a insetos parasitas.

Os autores realçaram ainda que, em seus experimentos, a coleta de COV para análise laboratorial foi realizada colocando plantas individualmente em câmaras de vidro de 1,0 l seladas com ar filtrado por carvão bombeado no fundo do recipiente. Todas as peças foram limpas com acetona e cozidas em forno a 150 °C por duas horas antes de usar. COVs foram capturados em um filtro Porapak Q contido em um cromatógrafo a gás de vidro de entrada entre tampões de lã de vidro salinizada. O tubo Porapak Q foi inserido no topo da câmara, e o ar, presente no topo do recipiente, foi puxado através do tubo a uma taxa de 750 ml/min por um período de três dias. Os COVs arrastados foram retidos nos filtros Porapak Q com 750 µl de éter dietílico re destilado e armazenado a -20 °C. A análise quantitativa de COV foi realizada usando um Hewlett-Packard (HP) 6890GC equipado com um resfriador injetor, um detector de ionização de chama e um 50m × 0,32mm de diâmetro interno (I.D.) HP-1 colado na camada capilar de sílica fundida em fase. A temperatura do forno foi mantida a 30 °C por dois minutos e então programada a 5 °C/min a 150 °C, seguido de 10 °C/min a 250 °C. O gás de arraste foi o hidrogênio.

A realização da identificação de COVs por espectrometria de massa (do inglês GC) e espectrometria de massa acoplada (do inglês GC-MS) e comparou os tempos de retenção com padrões autênticos; utilizando o hélio como gás de arraste, nesse processo. Os compostos foram identificados por comparação dos espectros obtidos com um banco de dados de espectros de massa. A proposta de desenvolvimento da malha de sensores descrita por este documento pode contribuir para melhorar a eficácia dos experimentos relatados por Tungadi et al. (2017). Wu et al. (2017) relataram que alguns patógenos de plantas podem manipular seus hospedeiros para realizarem a emissão de odores que são atraentes para os vetores dos patógenos. Os autores

apresentaram o fato do vírus do mosaico do pepino (do inglês CMV) transmitido por pulgões que atua como um indutor viral de atratividade do hospedeiro para insetos vetores. A atração de vetores induzida por patógenos pode ser dependente de odor, sugerindo a presença de um mecanismo específico pelo qual os patógenos manipulam a capacidade do hospedeiro de emitir odores que podem atrair vetores de doenças.

Muitas respostas de defesa a insetos-praga são regulados pelo fitormônio jasmonato (do inglês JA). Após a percepção de JA, a proteína F-box COI1 recruta proteínas de domínio ZIM de jasmonato (do inglês JAZs), os principais repressores da sinalização de JA, para a degradação do proteossoma 26S. A família JAZ de proteínas é amplamente distribuída entre as plantas. JAZs normalmente ligam e reprimem fatores de transcrição, que são liberados após a degradação induzida por JA de JAZs para ativar genes responsivos a JA essenciais para a defesa e desenvolvimento do hospedeiro. Alguns genes responsivos a JA mediam a produção de vários eventos metabólitos secundários de plantas, incluindo aumento da emissão de voláteis de plantas para controlar as interações planta-inseto. Os resultados obtidos no processo de experimentação dos sensores desenvolvidos e relatados neste documento orientam as conclusões para o aumento da eficiência em perceber a capacidade de patógenos em induzir plantas a emitirem COVs.

Beck et al. (2018) relataram que o produto químico base para proteção das plantas em muitos ambientes agrícolas corresponde a um material líquido ou sólido que é um importante aspecto da proteção vegetal que ocorre no ar circundante e dentro da própria planta. A utilização de compostos químicos produzidos bioticamente usados para comunicação entre organismos podem ser benéficos ou prejudiciais à planta, por insetos e micróbios. Os autores trouxeram uma perspectiva de interação entre plantas e abelhas. A visitação floral por insetos se faz necessária para aumentar a reprodução de muitas plantas. No entanto, os insetos visitantes também podem causar uma doença vetorial capaz de afetar negativamente a aptidão da planta e devastar colheitas. As plantas se adaptaram a esses eventos por meio do desenvolvimento de uma variedade de estratégias para maximizar a recompensa enquanto minimiza o risco. Talvez a principal dessas estratégias seja o aroma floral.

Os voláteis produzidos por micróbios agem como semioquímicos importantes, retransmitindo informações valiosas sobre a presença e qualidade dos recursos florais (néctar, pólen, óleos). Por exemplo, voláteis produzidos por microrganismos especia-

listas em néctar podem aumentar a eficiência de busca por recursos alimentares para polinizadores; agindo como um sinal tanto para a presença quanto para a qualidade do néctar. Entretanto, os semioquímicos microbianos podem aumentar a atração e aparência de flores para pragas e outros insetos polinizadores.

A maioria das interações planta-inseto é acompanhada por voláteis emitidos pelo vegetal e que são induzidos por herbivoria e/ou atividade microbiana associada. Quando voláteis, como terpenos são sintetizados em resposta a herbívoros danosos a planta, há um atraso de várias horas no auto-reconhecimento do dano e no início da realização de processos destinados a restaurar a homeostase após o ferimento, e preparar os tecidos adjacentes para a defesa contra os invasores. Os resultados obtidos ao longo da avaliação dos sensores elaborados durante a pesquisa de mestrado orientam as conclusões para o aumento da eficiência em perceber a capacidade de abelhas se relacionarem com plantas. O presente item do capítulo elencou a série de artigos que tratam a comunicação de plantas com os demais seres vivos presentes no ecossistema em que está inserida bem como elencou o posicionamento da pesquisa de mestrado de forma a contribuir com a temática.

3.2 OS PROCESSOS TRADICIONAIS PARA COLETA E ANÁLISE DE COVS

Esta seção tem por objetivo descrever os processos que atualmente são utilizados para coletar e avaliar COVs em laboratório e em ambiente aberto que foram descritos por Tholl et al. (2006). Nesse sentido, os autores classificaram os processos em três classes distintas: Amostragem de COVs em regiões de superfície; Separação por cromatografia gasosa; Avaliação temporal de COVs.

3.2.1 Amostragem de COVs em regiões de superfície

Os autores relataram que todos os métodos para a análise de gases emitidos por plantas buscam a identificação de perfis de emissão. No entanto, a escolha de qual sistema usar em um experimento de coleta e análise de COVs geralmente depende do problema biológico e material do vegetal que está sendo investigado. O primeiro passo é tomar a decisão se os COVs devem ser analisados a partir de plantas cultivadas em laboratório ou em seu habitat natural. Coletas de COVs com plantas em campo de

COVs exigem equipamentos de medição portáteis e robustos. Em comparação, as configurações do sistema no laboratório pode incluir coleta de amostras para análise via computador e uso de alguns dispositivos adicionais para reduzir a contaminação e controle de variáveis importantes como temperatura, intensidade de luz, fotoperíodo e umidade relativa.

Os autores também trouxeram o fato de que os compostos orgânicos voláteis são mais convenientemente coletados a partir de plantas inteiras. Contudo, muitas vezes é necessário amostrar COVs de partes ou órgãos de plantas, por exemplo, para distinguir gases de tecidos reprodutivos e vegetativos, com a finalidade de determinar se as emissões de COV são induzidas por estresse ou se a emissão é uma resposta sistêmica. Ainda há o caso de correlacionar as emissões de COV com tecidos específicos por meio de atividades enzimáticas. Neste caso, os COVs são amostrados de partes de plantas cortadas ou preferencialmente em órgãos de plantas para evitar a emissão adicional de COVs devido a efeitos de ferimento.

Tholl et al. (2006) realçaram que dependendo das espécies de plantas investigadas, as taxas de emissão de COV variam significativamente e, portanto, determinam qual instrumentação é necessária para uma coleta eficiente, adequada e com sensibilidade para análise. Enquanto poucas concentrações de COVs podem ser suficientes para fins analíticos, maiores quantidades são necessárias para análises mais profundas; como no caso dos bioensaios. Além disso, o pesquisador precisa decidir se vai realizar uma observação qualitativa dos voláteis liberados e/ou medir mudanças quantitativas, relacionadas ao desenvolvimento ou ao estresse nas emissões de COV. Por fim, equipamentos especializados que permitem o acesso remoto e análise de alto rendimento devem ser considerados para estudos do metabolismo de plantas.

Os autores iniciaram os relatos acerca dos processos atuais de avaliação de COVs descrevendo aqueles que tratam da emissão de gases por meio das partes da plantas que são situadas na superfície do solo. Os autores destacaram a importância do método não destrutivo para coletar voláteis, especialmente em relação à precisão na análise do perfil volátil das plantas e à sua relevância para estudos ecológicos. Também forneceram informações sobre materiais adequados para a construção de câmaras de coleta de partes da planta, enfatizando a importância de evitar materiais que possam contaminar os gases coletados durante o processo.

Os métodos estáticos de amostragem de COVs na região de superfície da planta,

ênfatizando o uso da micro extração em fase sólida (do inglês SPME). A SPME foi destacada como um método rápido e simples para coletar voláteis em limites de detecção muito baixos, na faixa de partes por bilhão por volume (ppbv), sendo baseada na ad/absorção de voláteis de uma fibra revestida com diferentes tipos de adsorventes.

A fibra é fixada dentro da agulha de uma seringa modificada, e os gases são coletados inserindo-se a agulha através de um septo de um recipiente de coleta da parte da planta avaliada. Ao pressionar o êmbolo da seringa, a fibra é exposta ao ambiente, permitindo a captura dos voláteis presentes no topo do recipiente, o que facilita a coleta seletiva desses compostos para análise posterior. Esse processo é ilustrado na 9 do documento.

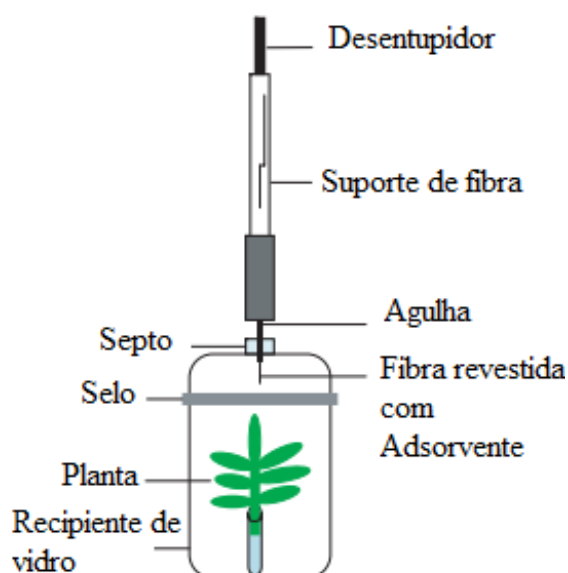


Figura 9 – Amostragem estática de *headspace* (SPME). Fonte: Adaptado de Tholl et al. (2006)

Os autores detalharam também os métodos dinâmicos de avaliação de COVs em regiões de superfície da planta. Neste método, um fluxo de ar contínuo passa pelo recipiente da amostra como gás transportador, aumentando o tamanho da amostra. Enquanto os voláteis são retidos em adsorventes, o gás transportador é circulado ou purgado para fora do recipiente, permitindo a coleta de quantidades suficientes de voláteis para detecção.

As técnicas de avaliação dinâmica eliminam alguns problemas associados aos processos anteriormente detalhados, como aumento de temperatura e umidade, ou acumulação de voláteis contaminantes, especialmente nos sistemas abertos. No entanto, é necessário garantir um suprimento de ar limpo filtrado, por exemplo, por meio de car-

vão ativado, para evitar interferência de impurezas nos compostos voláteis durante as etapas analíticas subsequentes. Os voláteis são retidos e enriquecidos em uma matriz adsorvente antes da análise por GC. Diversos materiais adsorventes estão disponíveis, com revisões detalhadas sobre sua escolha e aplicações. A matriz adsorvente é geralmente colocada em tubos estreitos de vidro ou metal com tampões de lã de vidro ou grades metálicas. Os autores detalharam os sistemas dinâmicos de avaliação de COVs conhecidos como decapagem em circuito fechado, puxar e empurrar-puxar.

A decapagem em circuito fechado destaca-se pela sua utilidade na coleta de voláteis induzidos por herbívoros, garantindo uma redução significativa na captura de contaminantes no ar, resultando em perfis de voláteis com uma relação sinal-ruído significativamente maior, permitindo a análise de compostos minoritários. Além disso, é facilmente configurável em câmaras climáticas controladas, permitindo a coleta de voláteis de várias plantas simultaneamente.

Os sistemas puxar e empurrar-puxar, por outro lado, operam com um fluxo constante de ar, sendo o puxar mais simples e portátil, adequado para plantas que emitem grandes quantidades de voláteis. No entanto, há um risco maior de captura de impurezas do ar ambiente, obscurecendo a detecção de compostos minoritários durante a análise por GC. O empurrar-puxar, mais flexível na regulação do fluxo de ar, é útil para coletar voláteis de plantas com diferentes taxas de emissão de COVs. Cuidados devem ser tomados para garantir um fluxo de ar homogêneo sobre a planta e evitar aumentos de temperatura e umidade.

As limitações dos sistemas dinâmicos incluem a falta de injeções repetidas de amostra e a degradação de compostos termicamente instáveis ou reações dos meios de captura. Além disso, materiais adsorventes podem apresentar limitações na adsorção de COVs com características opostas, demandando o uso de mais de um elemento para capturar misturas complexas representativas qualitativa e quantitativamente. Nesse sentido, a avaliação de voláteis por meio destes processos laborais requer a extração do vegetal de seu habitat natural para posterior análise. A proposta de avaliação de COVs por meio de malha de sensores permite a análise de dados com a planta em campo.

3.2.2 Separação por cromatografia gasosa

A análise por GC é rotineiramente utilizada para a separação e detecção de compostos voláteis de plantas capturados em matrizes adsorventes. Os autores detalharam o processo, conforme apresentado abaixo.

Para a análise por GC de COVs, amostras são injetadas como extratos de solvente em recipiente aquecido a 250–300 °C. Em um dessorvedor térmico de duas fases, os voláteis termicamente liberados são concentrados utilizando uma armadilha fria antes de serem injetados na coluna de GC. Os autores descreveram o método como tendo a finalidade de dessorção térmica direta de voláteis de órgãos florais ao colocá-los em pequenos frascos de quartzo inseridos em um injetor de GC modificado, exigindo cuidado para evitar a decomposição dos compostos em altas temperaturas. Para fins analíticos, os gases são comumente separados em colunas capilares de sílica fundida com diferentes fases estacionárias, como as não polares dimetilpolissiloxanos (por exemplo, DB-1, DB-5, CPSil 5), e as mais polares são polímeros de polietilenoglicol, incluindo Carbowax 20M, DB-Wax e HP-20M.

Após a separação na coluna de GC, os compostos voláteis podem ser analisados por diferentes detectores. Detectores de ionização em chama (FID) são comuns para análises quantitativas devido à sua ampla faixa dinâmica linear, resposta muito estável e alta sensibilidade, com limites de detecção da ordem de picogramas a nanogramas por composto. O detector de fotoionização (do inglês PID) também pode ser utilizado para a análise de terpenos voláteis. É mais sensível na presença de ligações duplas reativas, mas requer calibração cuidadosa para análises quantitativas.

Detectores de espectrometria de massa (do inglês MS) são os mais populares na análise de rotina por GC de voláteis de plantas. Na maioria dos espectrômetros de massa acoplados a GC de bancada, compostos que saem da coluna de GC são ionizados por impacto de elétrons e os íons resultantes são selecionados de acordo com sua razão massa/carga (m/z) ao entrar em uma armadilha de íons quadripolar ou em um filtro de massa quadripolar.

Cromatogramas de íons totais são obtidos, fornecendo informações sobre o tempo de retenção de cada composto e seu espectro de massa, consistindo em um padrão de fragmentação característico. Os limites de detecção de espectrômetros de massa estão na faixa de picogramas para o modo de varredura completa (escaneando íons

em uma ampla faixa molecular) e podem ser tão baixos quanto na faixa de femtogramas (em filtros de massa quadrupolar) no modo de monitoramento de íons selecionados que escaneia íons representativos de um composto.

A avaliação de voláteis por GC é um processo complexo que requer um aparato laboratorial específico. A proposta de avaliação de COVs por meio de malha de sensores dispostos em campo não só permite a análise de dados com a planta em seu habitat natural mas também contribui para uma avaliação estatística dos dados que complementa a avaliação por GC.

3.2.3 Avaliação temporal de COVs

Tholl et al. (2006) destacaram a dinâmica das emissões COVs em plantas, ressaltando que essas emissões são influenciadas por fatores ambientais e mostram variações temporais. Além disso, os autores enfatizaram que a liberação de voláteis pode ser induzida por danos causados por herbívoros, seja como sinais diretos ou indiretos de defesa.

Para monitorar essas mudanças nas emissões voláteis e correlacioná-las com parâmetros fisiológicos, expressão gênica e atividades enzimáticas, os autores afirmaram ser necessário determinar os perfis voláteis e as taxas de emissão em momentos distintos. Diversos sistemas foram desenvolvidos para análise de COVs em tempo real, como o sistema de amostragem de *headspace* dinâmico com dessorção térmica *on-line*, o GC rápido e transportável (zNose) e o sistema de espectrometria de massa por reação de transferência de prótons (do inglês PTR-MS). Cada um desses métodos tem suas vantagens e limitações em termos de resolução temporal, capacidade de detecção e mobilidade. O sistema PTR-MS permite a detecção rápida e sensível de uma variedade de COVs, substituindo em muitos casos a análise por GC-MS, com uma resposta em segundos por composto.

Os autores detalharam a técnica de análise das emissões de COVs de plantas de feijão-lima induzidas pelo fungo elicitor alametina usando o GC rápido e transportável zNose. Esse método envolve o uso de plantas em um recipiente de vidro, onde amostras de ar passam por uma câmara contendo os vegetais, e os voláteis são analisados a cada 15 minutos pelo zNose com uma taxa de amostragem de 20 segundos. O zNose oferece uma rápida coleta e análise de COVs, enquanto a amostragem de *he-*

adspace dinâmico com dessorção térmica permite uma resolução moderada do tempo de análise de COVs.

Já a análise em tempo real de terpenos voláteis e outros COVs no *headspace* de plantas e na atmosfera foi desenvolvida com base em tecnologias como a espectroscopia fotoacústica baseada em laser de infravermelho e a detecção de reações quimiluminescentes, como o sensor rápido de isopreno (do inglês FIS), permitindo a medição de terpenos voláteis com alto grau de reatividade em tempo real.

Essas técnicas oferecem contribuições significativas para a compreensão das emissões de COVs em plantas, embora tenham limitações específicas em termos de seletividade, detecção de compostos reativos e capacidade de distinguir entre isômeros. Desse modo, a proposta descrita neste documento envolve o uso de sensores eletrônicos dispostos em rede mesh para a avaliação da assinatura de COVs como alternativa de baixo custo aos procedimentos descritos por Tholl et al. (2006).

3.3 SENSORES ELETRÔNICOS ATUALMENTE UTILIZADOS NA DETECÇÃO DE COVS

Os sensores eletrônicos para detecção de COVs têm sido alvo de muitas pesquisas devido à sua ampla aplicação em áreas, como na detecção de elementos poluentes ambientais, no preparo de alimentos, na indústria farmacêutica e na detecção de doenças. O artigo de Haddi e Mavrodaris (2013) apresenta uma revisão sobre os avanços recentes na tecnologia da fabricação dos chamados "narizes eletrônicos" para detecção de COVs. Os equipamentos são assim chamados devido ao uso na detecção de compostos capazes de promover a emissão de odores.

Entre os sensores eletrônicos apresentados, destacam-se os sensores de condutividade térmica, de impedância eletroquímica, de espectroscopia de infravermelho por aproximação (do inglês NIRS), de espectroscopia de infravermelho por absorção (do inglês IR), de GC-MS e os sensores baseados em polímeros condutores.

Os sensores de condutividade térmica são bastante utilizados na detecção de gases devido à sua sensibilidade ao calor produzido pela oxidação dos COVs. Já os sensores de impedância eletroquímica são sensíveis à concentração de gases e podem ser usados para a detecção de baixas concentrações de COVs. Sensores de NIRS e IR são baseados na interação entre a luz e as moléculas dos COVs. Sensores

NIRS são usados para a detecção de COVs em soluções líquidas e os sensores IR são utilizados na detecção de COVs gasosos. A GC-MS corresponde a uma técnica de detecção amplamente utilizada na indústria e na pesquisa científica, permitindo a identificação de COVs com alta precisão e sensibilidade.

Haddi e Mavrodaris (2013) conceituaram os sensores "nariz eletrônico" como sendo baseados em polímeros condutores são inspirados na capacidade do nariz humano de detectar diferentes odores. Os autores ainda afirmaram que esses sensores são compostos por polímeros condutores que apresentam diferentes respostas elétricas quando expostos a diferentes COVs. A detecção de COVs vem sendo cada vez mais estudada devido ao fato de alguns desses compostos terem efeitos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. Nesse contexto, sensores eletrônicos têm sido amplamente utilizados para detectar a presença desses compostos em diferentes ambientes. Dessa forma, a composição em rede mesh de "narizes eletrônicos" contribui para a realização do cruzamento de dados oriundos de diversos sensores dispostos em campo a fim de elaborar uma análise mais completa da saúde dos vegetais presentes em campo.

3.4 NÓ SENSOR ELETRÔNICO

Catini et al. (2019) descreveram um processo de baixo custo para medição e análise de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) emitidos por plantas utilizando um sensor eletrônico baseado na arquitetura LoRaWAN e processador ARM. Os autores iniciaram o documento descrevendo os processos atuais de análises de plantas utilizando parâmetros ambientais como: Iluminação, umidade, temperatura e composição do solo. Contudo, com os recentes avanços na fabricação de sensores; informaram que tornou-se possível a medição desses parâmetros não mais emitidos pelo ambiente; mas sim pelas plantas e isso permitiu melhorias na tomada de decisão em prol do melhor cultivo dos vegetais.

Os então enfatizaram que um desses parâmetros importantes a serem analisados são os COVs que apresentam diversas funções; dentre elas: Atração de insetos polinizadores e repulsão de parasitas. Os autores detalharam ainda que existem uma gama de sensores no mercado que podem ser utilizados para detecção e medição dos parâmetros das plantas. No entanto, nem todos garantem confiabilidade necessária aos

variados testes que auxiliam nas tomadas de decisão supracitadas. Dessa forma, o documento visou descrever o desenvolvimento de sensores sem fio capazes de medir diversos parâmetros fisiológicos e ambientais. Além de apresentar a aplicação dos sensores em pequenas mudas em vasos.

Catini et al. (2019) ainda apresentaram os fatores usados na escolha dos sensores e quais sensores foram escolhidos. Levou-se em consideração o uso de sensores de baixo custo, consumo e a opção por saída digital que permitiu a conexão segura com os demais componentes eletrônicos. A Tabela 1, retirada do artigo, ilustra os sensores escolhidos.

Parâmetro	Dispositivo	Fornecedor	Especificações
Iluminância [lux]	TSL2561	Adafruit	3,80 × 2,60 mm ² , 750 µW
Temperatura [°C] e RH [%]	SHT31	Sensirion	2,5 × 2,5 mm ² , 5 µW
Total de COVs [ppb]	SGP30	Sensirion	2,45 × 2,45 mm ² , 150 mW
Total de COVs [ppb]	CCS811	AMS	2,7 × 4,0 mm ² , 46 mW
Índice de Qualidade do Ar	BME680	Bosch	3,0 × 3,0 mm ² , 36 mW

Tabela 1 – Lista de Sensores. Fonte: Adaptado de Catini et al. (2019)

Catini et al. (2019) ainda enfatizam a quantidade de sensores usados para medição de gás com tais características e presentes no mercado é bastante limitada. Catini et al. (2019) selecionaram sensores de três fornecedores diferentes: Sensirion, Bosch e AMS. Cada um é fabricado com base na tecnologia de metal óxido e são integrados a sistemas de medição eletrônica. Enfatizou-se o fato de que boa parte desses fornecedores isolam o acesso aos dados brutos por meio de algoritmos proprietários que realizam a leitura dos sensores e entregam o valor genérico de medição de COVs. Os autores também apontaram as vantagens e desvantagens de uso de cada sensor listado acima.

Catini et al. (2019) afirmaram que o BME680 da Bosh, por exemplo, fornece uma avaliação da qualidade do ar (do inglês IAQ) que é medida por meio de um pré-processamento interno. Esse parâmetro é usado para a medição de qualidade do ar de ambientes de convivência. O valor do IAQ é adquirido com base no sensor de gás e na medição de temperatura, umidade relativa e pressão. O BME680 pode saturar seu valor medido quando submetido a baixa concentração de COVs e alta umidade relativa. Entretanto, tal condição é reversível e o sensor volta a realizar medições corretamente quando a umidade relativa diminui. O CCS811, assim como o SGP30 e

o BME680, também faz a medição de COVs. Entretanto, a realização de experimentos que comprovaram a não adequação para aplicação descrita devido ao fato de ser vulnerável a altos valores de umidade relativa. Esse ponto foi explorado no campo "Metodologia" dessa dissertação. Segundo os autores, o CCS 811 pode ser danificado de maneira irreversível quando submetido a umidade relativa acima de 95%.

O SGP30 da Sensirion faz a integração de quatro sensores semicondutores de metal óxido e realiza a medição do total de COVs por meio do processamento externo no qual os sinais do sensor de gás são integrados com o valor da temperatura e umidade relativa fornecida pelo sensor SHT31; aplicando um algoritmo proprietário. Segundo os autores, o SGP30 apresentou-se com maior robustez, levando-se em conta a umidade relativa e portanto, consideraram este sensor como o mais indicado para a aplicação de análise de plantas. Os autores realçaram ainda que os três sensores de gás são capazes de medir valores de CO₂ equivalente que não coincide com o valor real uma vez que visa fornecer uma avaliação de CO₂ produzido pela respiração humana. O valor provavelmente não é relevante para aplicação descrita.

Os autores projetaram o sistema para realizar transmissões de longo alcance e ser instalado em lavouras; bem como o acompanhamento das plantas durante o transporte. Os autores desenvolveram o design do sensor com base no chip S76G, da Acsip, integrado ao microcontrolador de baixo consumo de energia STM32L0 com núcleo ARM Cortex-M0. O equipamento é dotado de um transmissor LoRa Sx1276 e um receptor Sony GNSS CXD5603GF para medição de posição com alta precisão. Os autores trouxeram a Figura 10, mostrando os detalhes do projeto da placa.

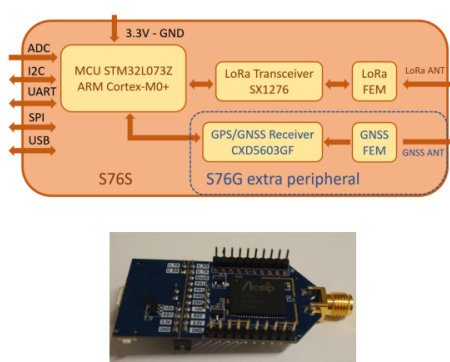


Figura 10 – Sensor de baixo custo para detecção de VOCs. Fonte: Catini et al. (2019)

Catini et al. (2019) descreveram um experimento onde o sensor foi testado em dois cenários distintos; apresentados na Figura 11. Em cada etapa, duas plantas cultiva-

das no mesmo solo e contidos em vasos de plantas semelhantes foram mantidos por onze dias sob testes; onde uma das plantas foi coberta por uma manta preta, privando de luz e água; enquanto a outra planta foi mantida sob condições ambientais normais. As duas plantas foram também mantidas em um recipiente plástico vedado o suficiente para permitir a medição de COVs liberados por plantas, mas com uma entrada de ar suficiente, conforme a foto abaixo. Outro ponto a realçar é o fato de que o sensor passou a enviar informações sobre os parâmetros supracitados a cada 5 minutos para um computador de maneira remota, utilizando o protocolo LoRa.



Figura 11 – Cenários de testes do sensor de Catini et al. (2019). Fonte: Catini et al. (2019)

Catini et al. (2019) registraram os dados regularmente enquanto o sensor de gás (CCS811) passou por dois períodos de mau funcionamento. Oscilações de temperatura e umidade seguiram as condições ambientais. Contudo, os autores informaram que a umidade no recipiente de análise onde estava a planta mantida no escuro foi maior do que o detectado no recipiente exposto à luz natural, e isso pode estar relacionado com a condição de estresse da planta. O comportamento dos COVs totais sofreu bastantes variações ao compararmos o processo com a planta exposta a luz e planta disposta no escuro. O sensor de gás passou por dois períodos de mau funcionamento devido a um rápido aumento de umidade relativa na câmara de medição. Esses períodos foram removidos da análise seguinte. Com o objetivo de avaliar melhor os resultados das análises, os autores plotaram gráficos da amostragem temporal dos parâmetros avaliados nos dois cenários. A Figura 12 também extraída de Catini et al. (2019) elucida os resultados obtidos pelos autores e mostra que no cenário onde a

planta sofreu ausência de luz e água, os valores coletados pelos sensores se mostram com variações.

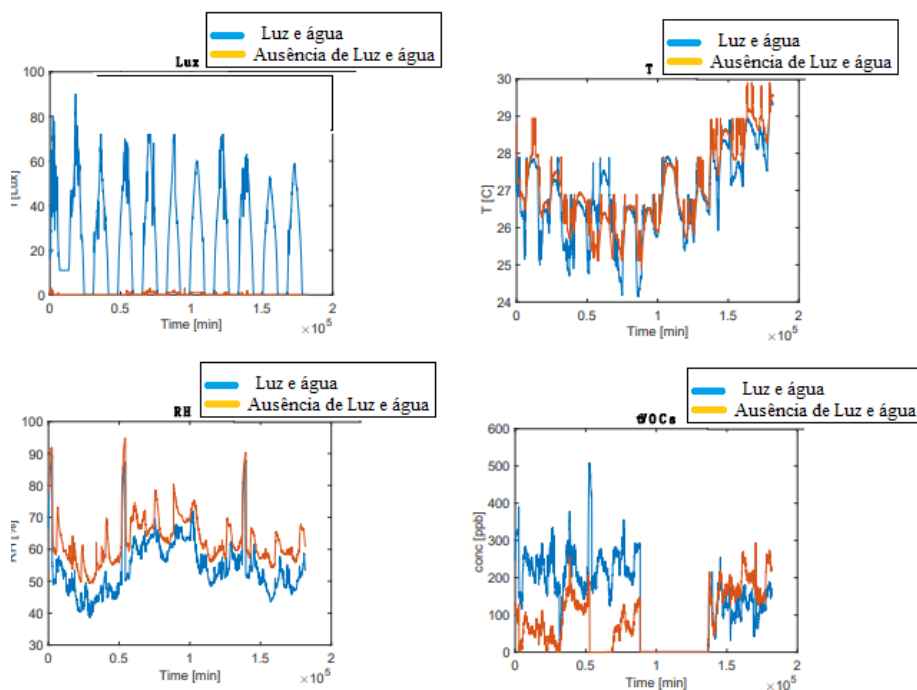


Figura 12 – Gráficos de umidade, temperatura, luz e VOCs. Fonte: Adaptado de Catini et al. (2019)

Os autores concluíram o documento informando que a tecnologia de sensores ambientais (iluminação, temperatura e umidade relativa) é bastante sólido, e uma série de sensores de bom desempenho, baixo custo de aquisição e baixo consumo de energia estão cada vez mais disponíveis. No entanto, o sistema integrado de sensores de gás com tecnologia CMOS proposto apresenta um processamento interno voltado principalmente para compensação de desvantagens típicas desses sensores, como desvio e falta de seletividade.

A análise laboral descrita acima permitiu a identificação do fato de que os COVs totais sofrem variação conforme as plantas são dispostas em diferentes condições ambientais. Devido a isso, mesmo que essa quantidade seja apenas uma avaliação grosseira da composição real do ar, ela se mostrou útil para monitorar eventos de estresse em plantas.

Os autores trouxeram avaliações pouco comprobatórias acerca do funcionamento e limitações de cada sensor. Além disso, os artigos anteriores elucidaram a importância da avaliação temporal dos COVs em condições distintas. Nesse sentido, fez-se

necessário complementar Catini et al. (2019) realizando a avaliação do espectro de frequência dos dados e a análise mais aprofundada de cada sensor descrito pelos autores; explorando outras condições (como a avaliação dos dados na ausência da planta, por exemplo).

3.5 REGULAÇÃO DA EMISSÃO DE COVS PELO CICLO CIRCADIANO, LUZ E TEMPERATURA

Cheng et al. (2016) descreveram um estudo sobre a investigação dos efeitos de multi fatores (relógio circadiano endógeno, luz e temperatura) na formação e emissão de fenilpropanóides e benzenóides voláteis florais (do inglês VPBs); que são os principais voláteis em flores de *Petunia hybrida*. Propuseram o relógio circadiano endógeno como o fator mais importante na regulação da emissão rítmica de VPBs e expressões de genes estruturais envolvidos na via biossintética de VPBs. Entretanto, os autores informaram que isso não afetou a expressão níveis de genes estruturais envolvidos na via *downstream* e reguladores relacionados a VPBs.

Os COVs da parte vegetativa são envolvidos na proteção, efeito contra o estresse biótico, repulsão de parasitas ou atração de insetos que combatem os parasitas. Já a parte floral se relaciona, segundo os autores, com a atração por polinizadores específicos da espécie. Os autores ainda indicam que os voláteis têm aplicações econômicas potenciais, incluindo melhoria na conservação e sabor dos alimentos. Os autores propuseram a elaboração do esquema do relógio circadiano, com luz e temperatura como os fatores importantes que regulam a formação e emissão de voláteis florais. Segundo os autores, até o momento, a maioria dos relatos de pesquisa se concentrou no estudo do efeito do relógio circadiano ou da luz e dados de temperatura de maneira isolada para a formação e emissão de voláteis florais.

Pouco se sabe sobre como os fatores multifatoriais integram e regulam a formação e emissão de voláteis florais e qual fator desempenha um papel mais importante na regulação ou os três fatores têm influências equivalentes. Para responder tais perguntas, utilizaram a *petunia hybrida*, que é um modelo de planta usada para investigar VPBs florais devido ao seu metabolismo relativamente baixo. Os autores investigaram os efeitos integrados do relógio circadiano, luz e temperatura nos VPBs emitidos e propuseram um modelo esquemático de como a emissão de VPBs ocorre com base

nesses fatores.

O principal experimento realizado visou avaliar o relógio circadiano da Petúnia. Dessa forma, As plantas foram cultivadas sob condições padrão até a maturidade reprodutiva, desde a semente e foram separadas em estágios; do um ao oito. Para realizar a medição de voláteis, fez-se uso de uma flor no estágio 8 (Figura 13), as nove horas da manhã, e colocou-se em um frasco de 10mL com 5mL de água da torneira; conforme visto na foto abaixo. As flores avaliadas nos frascos foram colocadas em diferentes condições de temperatura e luz e tal coleta de voláteis foi realizada por dez minutos.



Figura 13 – Flor no estágio 8 sob análise. Fonte: Cheng et al. (2016)

Após a realização do processo descrito acima, Cheng et al. (2016) constataram que os principais voláteis emitidos pelas flores de *Petunia hybrida* foram VPBs incluindo benzoato de metila, benzaldeído, benzil álcool, 2 feniletanol, isoeugenol, benzoato de benzila, fenil-acetaldeído e acetato de benzilo. Entre eles, o benzoato de metila foi o maior VPB emitido. Além disso, a maioria dos VPBs apresentou emissão rítmica com níveis máximos durante a noite menos escuro contínuo e diferentes condições de qualidade de luz, como luz azul e luz vermelha; conforme visto na Figura 14.

Os autores ainda relataram que voláteis emitidos pelas flores de petúnia parecem seguir um processo de ritmo circadiano endógeno, com pico aproximadamente após 4h e 6h de escuridão. Não só a sua emissão, mas também os níveis de armazenamento endógeno e os VPBs seguem esse ritmo circadiano. Concluíram a pesquisa informando que investigaram os efeitos de multi fatores incluindo relógio circadiano, luz e temperatura na formação e emissão da maioria dos VPBs. O relógio circadiano endógeno foi colocado como o fator mais importante na regulação da emissão rítmica

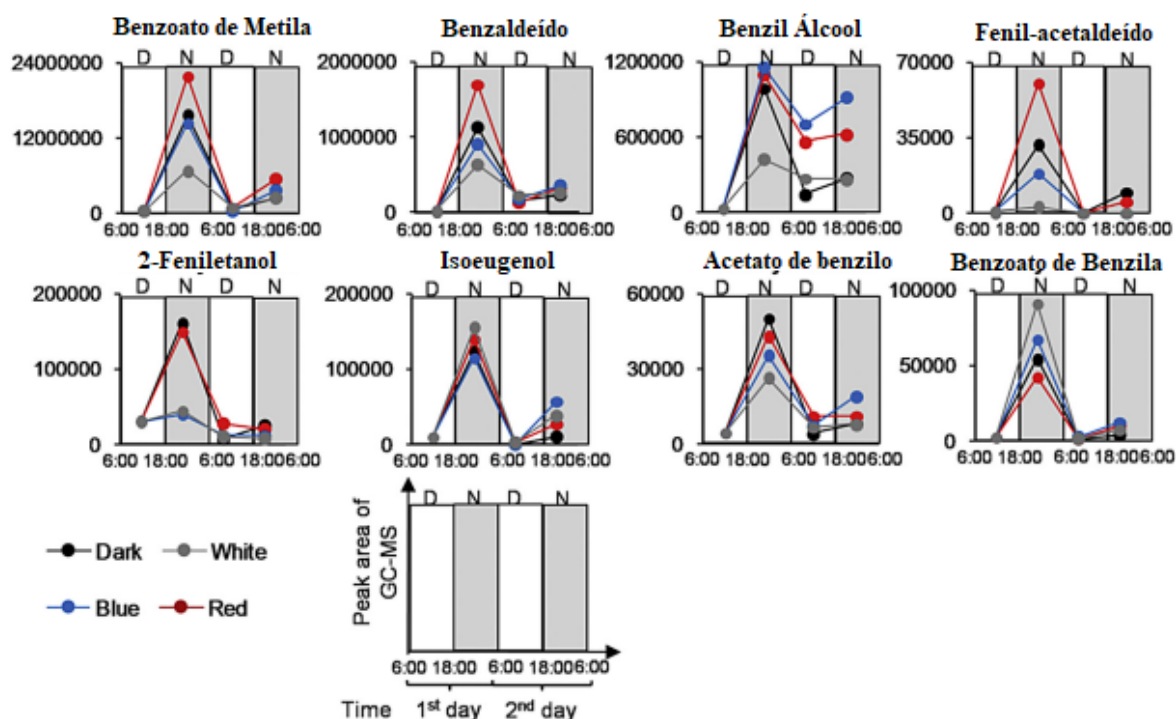


Figura 14 – Rítmo de emissão de VOCs. Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2016)

de VPBs e expressões de genes estruturais envolvidos no *upstream* via biossintética de VPBs. Em contraste com a luz, a temperatura ambiente foi um dos fatores que se mantiveram mais constantes e que afetou a emissão de VPBs. A emissão de VPBs pode ser inibida em um curto espaço de tempo, aumentando temperatura. Tais informações ajudam a entender mecanismo de emissão de voláteis florais e responde o motivo de alguns gases emitidos pelas plantas podem ser cheirados, sentidos em determinado momento.

O processo rítmico de emissão de COVs relatado por Cheng et al. (2016) compreende parte fundamental de uma avaliação de gases emitidos por plantas. Desse modo, fez-se necessário avaliar a capacidade da rede mesh de sensores de baixo custo desenvolvida ao longo da pesquisa em detectar o processo rítmico de emissão de COVs.

3.6 RESUMO DO CAPÍTULO

O presente capítulo visou apresentar a descrição dos principais artigos que influenciaram o teor desta dissertação de mestrado. Os artigos foram classificados entre os que especificaram as motivações das plantas em emitir Compostos Orgânicos Vo-

láteis (COVs); os principais problemas que influenciam a emissão de COVs por parte de plantas; os principais métodos de avaliação de COVs e as vantagens de se utilizar sensoriamento para avaliar os voláteis. Além disso, o capítulo propõe orientar o leitor para os desafios dos artigos nos quais a pesquisa de mestrado se propõe a solucionar.

A subseção 3.1 revisa teorias recentes sobre a comunicação vegetal por meio de COVs. Autores como Bouwmeester et al. (2019) destacam a importância da comunicação planta-inseto via COVs, influenciando crescimento e defesa. A diversidade química dos COVs é discutida, enfatizando a função na atração de insetos benéficos e herbívoros. A malha de sensores proposta na pesquisa de mestrado busca aprofundar essa compreensão. Trabalhos adicionais exploram temas como manipulação de plantas por patógenos e interações com insetos polinizadores. A pesquisa contribui para a avaliação da comunicação planta-inseto por meio da detecção de COVs, oferecendo insights valiosos nas interações ecológicas.

O texto de 3.2 discute métodos tradicionais para coleta e análise de COVs em plantas. Classificados em amostragem, cromatografia gasosa e avaliação temporal, os métodos envolvem técnicas laboratoriais específicas. Os autores destacam a importância da escolha do método de acordo com a espécie vegetal e ressaltam a dinâmica das emissões ao longo do tempo. A proposta alternativa apresentada envolve o uso de sensores eletrônicos em uma malha para avaliação de COVs como opção de baixo custo. O texto de 3.3 aborda sensores eletrônicos usados na detecção de COVs, conhecidos como "narizes eletrônicos". Diversos tipos são discutidos, incluindo sensores de condutividade térmica, impedância eletroquímica, NIRS, IR, GC-MS e baseados em polímeros condutores. Os "narizes eletrônicos" baseados em polímeros condutores são destacados pela capacidade de detectar diferentes odores. O artigo de Haddi e Mavrodaris (2013) revisa avanços nessa tecnologia.

O estudo de 3.4 apresenta o desenvolvimento de um nó sensor eletrônico para medir COVs emitidos por plantas, usando arquitetura LoRaWAN e processador ARM. Os autores enfatizam a importância da medição desses compostos no cultivo de vegetais. O sensor escolhido inclui TSL2561, SHT31, SGP30, CCS811 e BME680. Experimentos mostram variações nos COVs totais em diferentes condições ambientais, destacando a utilidade na detecção de estresse nas plantas. O estudo conclui que, embora os sensores ambientais sejam robustos, o processamento interno dos sensores de gás visa compensar desvantagens típicas. Limitações e funcionamento de

cada sensor são discutidos. O estudo de Cheng et al. (2016) investiga os efeitos do relógio circadiano, luz e temperatura na formação e emissão de compostos orgânicos voláteis florais (VPBs) em flores de *Petunia hybrida*. Destacam o relógio circadiano como o fator mais influente na regulação da emissão rítmica de VPBs. O experimento revela que VPBs, como benzoato de metila, apresentam emissão rítmica, com picos durante a noite. O estudo contribui para a compreensão dos mecanismos de emissão de voláteis florais e destaca a importância dos fatores ambientais no processo. Esta subseção visou elencar um pequeno resumo no Quadro 1 das obras supracitadas e suas contribuições para o desenvolvimento da pesquisa.

Autores	Contribuição	Desafios Identificados
Bouwmeester et al. (2019) Riedlmeier et al. (2017) Heil e Karban (2010)	Comunicação entre plantas e seres vivos com COVs Papel de COVs para a resistência das plantas COVs como sinais de defesa	Elaborar técnica simples de avaliação de sinais de COVs em ambiente de campo
Tungadi et al. (2017) Wu et al. (2017) Beck et al. (2018)	Atuação de parasitas no aumento da emissão de COVs Atuação de parasitas no aumento da emissão de COVs COVs como agentes no processo de polinização	Desenvolvimento de dispositivos para avaliação de sinais de COVs
Tholl et al. (2006) Haddi e Mavrodaris (2013)	Experimentos laborais e de campo para avaliação de COVs Narizes eletrônicos para detecção de COVs	Elaboração de dispositivos para avaliação do ciclo circadiano de emissão de COVs
Catini et al. (2019) Cheng et al. (2016)	Sensor de baixo custo para detectar a emissão de COVs por plantas Detalhamento da relação entre COVs e o ciclo circadiano de Plantas	Desenvolvimento de sensores capazes de avaliar o ciclo circadiano de COVs usando baixo custo computacional

Quadro 1 – Contribuições de Autores sobre COVs em Plantas. Fonte: Própria.

4 MATERIAS E MÉTODOS

O capítulo destina-se a apresentar as metodologias aplicadas aos testes e experimentos utilizados no projeto. O objetivo é descrever os instrumentos e os processos que regiram os testes e experimentos deste trabalho. É válido realçar que a pesquisa objetivou a identificação de oportunidades para validar métodos de desenvolvimento de WSNs em ambientes agrícolas.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A rede de sensores e os métodos para elaborá-la foram executados por meio de pesquisas de campo, aplicadas e descritivas. Segundo Freitas e Prodanov (2013) as pesquisas aplicadas tem o objetivo de promover a construção de conhecimentos práticos que levam à solução de um problema específico. Tumelero (2018) contribuiu com o conceito dado pelos autores supracitados quando informou que as pesquisas aplicadas tem o objetivo de resolver questões práticas acerca de um objeto estudado.

Freitas e Prodanov (2013) informaram que as pesquisas descritivas são uma forma de levantamento de informações que utilizam técnicas padronizadas para coletar dados. Pesquisas descritivas são utilizadas, sobretudo para ordenar, registrar, analisar e observar informações sobre um objeto de estudo (sinal de radiofrequência).

A pesquisa de campo, segundo Piana (2009) exige do pesquisador a necessidade de ir até a localidade onde o fenômeno, objeto estudado ocorre. Corresponde ao tipo de pesquisa que busca o dado diretamente da população em que este ocorre.

4.2 UNIVERSO E AMOSTRA

Mathias (2022) conceituou universo como sendo um conjunto abrangente de elementos em que se deseja representar em um estudo. Freitas e Prodanov (2013) afirmaram que em geral, os estudos e pesquisas englobam um universo de elementos ou indivíduos tão grande que não é possível considerá-lo em sua totalidade. Diante desse quadro, Freitas e Prodanov (2013) informaram que deve-se trabalhar com uma pequena parte desses indivíduos que formam o universo: a amostra.

O universo estudado, considerando os conceitos relacionados acima, é composto pelos equipamentos de emissão e recepção de sinais de radiofrequência transmitidos através do protocolo Mesh e HTTP. Faz parte da amostra analisada: Os sensores inteligentes desenvolvidos ao longo da pesquisa.

Os experimentos que compõe o corpo prático da pesquisa proposta por este documento foram embasados sob a ótica dos três pilares que são melhor explicados em 4.4 e em 5.2:

- Transdutor inteligente capaz de coletar dados de temperatura, umidade, pressão, CO₂, COV, H₂, Etanol e resistência elétrica;
- Armazenamento dos dados em planilha do Google Sheets;
- Avaliação estatística dos dados por meio de algoritmos escritos em Python, utilizando o Google Colaboratory.

4.3 METODOLOGIA DA EXPERIMENTAÇÃO

O tema proposto pela pesquisa visou averiguar a capacidade de detectar, estimar e medir diferentes substâncias emitidas por plantas, a fim de identificar possíveis doenças ou anomalias no vegetal. Diante deste quadro, observou-se a necessidade de avaliar a sensibilidade dos sensores utilizados em detectar variações sutis nos parâmetros ambientais. Assim, realizaram-se uma série de experimentos com o intuito de determinar os limites de leitura máximos e mínimos de cada sensor em relação aos parâmetros medidos. Além disso, foram conduzidos testes funcionais para verificar a capacidade dos sensores em capturar diferenças significativas na densidade de partículas presentes no ambiente. Esses experimentos constituíram uma etapa crucial na validação da eficácia dos sensores utilizados no monitoramento das condições ambientais relevantes para o crescimento e saúde das plantas. Também foram realizados experimentos adicionais para investigar a capacidade dos sensores em detectar padrões temporais na emissão de substâncias voláteis pelas plantas. Um desses experimentos envolveu a análise da presença e padrões temporais de tVOCs emitidos por amostras de arruda (*Ruta graveolens*). Outro experimento foi conduzido em uma estufa inteligente, onde diferentes cenários foram testados para avaliar o impacto da

presença e ausência de plantas, bem como da iluminação, na qualidade do ar. Além disso, uma rede *mesh* de sensores IoT foi estabelecida na estufa para avaliar a capacidade dos sensores em detectar a presença da planta e a influência da mesma nos dados coletados.

O desenvolvimento dos nós-sensores para este estudo foi conduzido em duas versões, visando processar dados ambientais e de compostos orgânicos voláteis (COVs) emitidos por plantas. Ambas as versões foram desenvolvidas segundo o paradigma da IoT), incorporando contribuições anteriores de Catini et al. (2019). A construção da primeira versão teve como objetivo confirmar informações sobre o desempenho dos sensores quando submetidos a condições extremas cuja motivação está supracitada. A segunda versão foi projetada para uma coleta de dados mais robusta, incorporando sensores adicionais para melhorar a capacidade de análise. O Transdutor Inteligente Versão II foi concebido de acordo com a proposta apresentada por Catini et al. (2019). A escolha dos elementos dos dispositivos projetados foi motivada pela revisão do artigo, considerações de preço, facilidade de aquisição e viabilidade para processar sinais temporais, especialmente os índices de voláteis emitidos por plantas. Os *firmwares* desenvolvidos para os Transdutores Inteligentes Versão I e II incorporaram estratégias distintas para a transmissão de dados ao Google Sheets, incluindo o uso de redes mesh e solicitações HTTP. Ao longo deste processo, três firmwares diferentes foram desenvolvidos usando linguagem C/C++.

No desenvolvimento do *Firmware* Versão I, a ênfase estava na criação de uma rede mesh. A motivação para essa escolha foi proporcionar uma comunicação robusta e eficiente entre os transdutores, especialmente em ambientes agrícolas onde a conectividade pode ser desafiadora. A interação entre os nós da malha mesh permitiu a troca de dados de forma dinâmica e autônoma. Já na Versão II, além do uso da rede mesh, a transmissão de dados ao Google Sheets foi implementada por meio de solicitações HTTP. Isso possibilitou a comunicação direta com a plataforma online, aproveitando a conectividade Wi-Fi presente em laboratório. A decisão de adotar ambas as abordagens teve como base a necessidade de avaliar historicamente os dados dos sensores previamente descritos. Na Versão III do *Firmware*, que utilizou dois Transdutores Inteligentes Versão II em uma rede mesh, os dados foram enviados para um Nó-raiz. Essa estratégia proporcionou uma análise mais concreta dos parâmetros coletados em uma estufa. A motivação para a escolha da rede mesh nas

diferentes versões reside na capacidade de criar uma infraestrutura de comunicação auto-organizável, onde a topologia da rede pode ser dinâmica e imprevisível. O uso do HTTP permitiu estender essa capacidade para ambientes mais amplos, garantindo a conectividade com a plataforma Google Sheets em cenários diferentes. A combinação dessas abordagens proporcionou a transmissão eficiente de dados, adaptando-se às demandas específicas de cada experimento.

A recepção dos dados ocorre por meio de requisições HTTP POST, sendo processados pelo JavaScript no Apêndice E e visualizados em uma planilha Google Sheets. Após o armazenamento, possibilita-se o download local para análise estatística. A escolha do Google Colaboratory para a avaliação se deve à facilidade de acesso aos recursos estatísticos da linguagem Python e à capacidade de armazenamento em nuvem. A plataforma oferece flexibilidade para processar trechos específicos ou o documento inteiro. O procedimento avaliativo utiliza algoritmos Python executados no Google Colaboratory. Após o armazenamento, os dados passam por um corte histórico, usando o algoritmo do Apêndice F para gerar subconjuntos com base em datas específicas. Esses subconjuntos são, então, submetidos ao algoritmo do Apêndice G, onde inferências estatísticas são realizadas (cálculo das Médias dos dados, elaboração das matrizes de correlação e avaliação da DFT). Essas escolhas visam a praticidade de manipulação e a eficiência na realização de análises estatísticas pontuais ou abrangentes.

4.4 SENSORES

O projeto de pesquisa envolveu o desenvolvimento de duas versões de um transdutor inteligente capaz de processar dados do ambiente e de COVs emitidos por plantas. Diante deste fato, o presente subcapítulo tem por objetivo descrever os aspectos de *hardware*. Além de explicar o processo decisório pelos componentes que compõe cada transdutor.

A busca pela execução dos experimentos descritos nesse documento envolveu o desenvolvimento de duas versões de um transdutor inteligente com base no paradigma IoT e utilizando as contribuições de Catini et al. (2019) anteriormente destacados. Inicialmente, foi desenvolvido a versão composta pelos sensores CCS811 e DHT22. Posteriormente foi elaborada uma versão mais robusta, contendo um sensor

BME680, SHT31, TSL2561 e SGP30. Os processadores escolhidos para este projeto foram o ESP8266 na versão um e o ESP32, anteriormente citado, na versão dois. O processo para escolha dos processadores supracitados girou em torno do fato de serem componentes baratos, de fácil acesso no mercado local e com capacidade de processamento adequada ao projeto.

4.4.1 Transdutor Inteligente Versão I

A construção do Transdutor Inteligente Versão I (Figura 15) visou confirmar as informações afirmadas por Catini et al. (2019) sobre o CCS811 perder a capacidade de estimar leituras precisas quando saturado; bem como validar o uso do sensor DHT22 na obtenção de temperatura em ambientes agrícolas. Escolheu-se o sensor DHT22 para a validação no cenário estudado por garantir leituras de temperatura e umidade, ser de baixo custo e ter fácil acesso no mercado local.

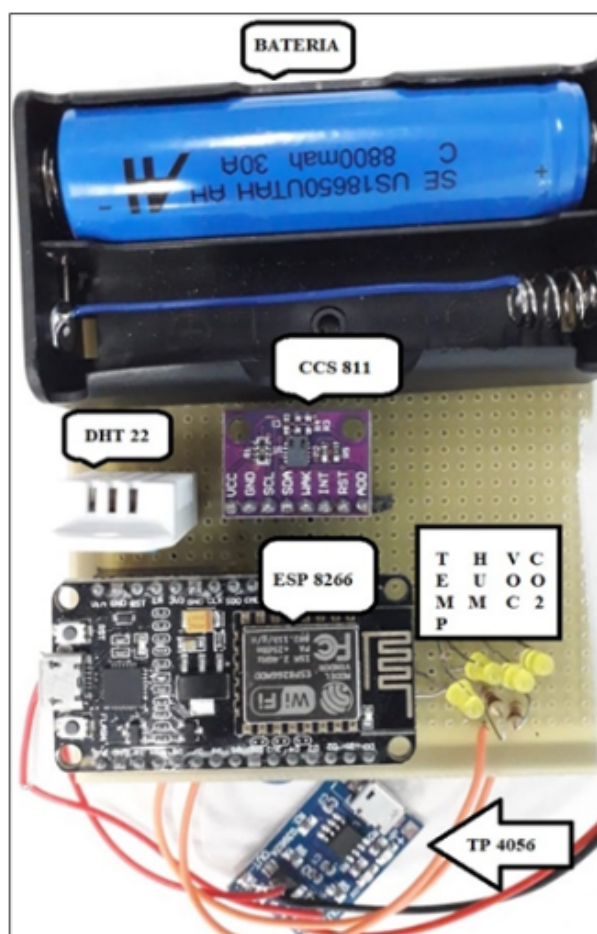


Figura 15 – Sensor Versão I. Fonte: Própria.

O Sensor CCS811 (Figura 16), segundo informou Alfano et al. (2020), é um sen-

sensor de qualidade do ar que mede a concentração de dióxido de carbono e compostos orgânicos voláteis no ambiente. O sensor utiliza um algoritmo avançado para compensar variações de temperatura e umidade, garantindo alta precisão nas medições. O CCS811 pode ser utilizado em diversas aplicações, como sistemas de ventilação e ar condicionado, purificadores de ar e monitores de qualidade do ar em ambientes internos. A Tabela 2, observada no AMS (2018), elenca as especificações técnicas do equipamento.

Alimentação	1,8V a 3,6V DC
Potência de consumo	60 mW
Temperatura de operação	-5 °C a 50 °C

Tabela 2 – Especificações do CCS811. Fonte: Própria.

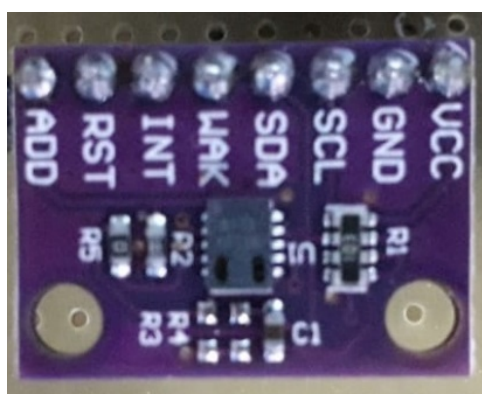


Figura 16 – Sensor CCS811. Fonte: Própria.

O sensor CCS811 corresponde a um dispositivo de medição de gás altamente preciso, capaz de detectar gases tóxicos e outros compostos orgânicos voláteis (COV). O sensor foi projetado para ser usado em sistemas de monitoramento de qualidade do ar interno, dispositivos vestíveis e outros aplicativos portáteis. O sensor é baseado em tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) e usa um chip sensor avançado para detectar gases em uma faixa de concentração de 0 a 10000 ppm (partes por milhão). Esse sensor apresenta uma resposta rápida e precisa, com uma taxa de amostragem de 1 Hz. O sensor possui um algoritmo interno avançado de correção de temperatura e umidade, que ajuda a garantir que as leituras do sensor sejam confiáveis e precisas, mesmo em ambientes extremos. AMS (2018) também informou que o CCS811 é altamente sensível e pode detectar gases em concentrações muito baixas, tornando-o ideal para uso em sistemas de monitoramento de qualidade do ar interno.

O CCS811 é um sensor de baixa potência e usa menos de 1 mA de corrente em operação. O sensor se comunica com o microcontrolador host através de uma interface I2C padrão e possui várias configurações e recursos personalizáveis, como a taxa de amostragem e a resolução do sensor. O sensor também tem um modo de economia de energia para prolongar a vida útil da bateria em dispositivos portáteis. O sensor CCS811 é uma ferramenta valiosa para medir a qualidade do ar interno e detectar a presença de gases tóxicos e COVs. Ele é altamente preciso, sensível e confiável, e é capaz de operar em uma ampla faixa de concentração de gases. O sensor é fácil de usar e configurar, e pode ser integrado em uma variedade de sistemas de monitoramento de qualidade do ar interno, dispositivos vestíveis e outros aplicativos portáteis.

O DHT22, relatou Liu (2012), corresponde a um módulo sensor capacitivo de temperatura e umidade. A folha de dados do equipamento ainda indica que o artefato conta com um circuito integrado (do inglês CI) de oito bits que salva na memória as constantes de calibração das medições de temperatura e umidade. Desse modo, cada unidade deste sensor é calibrada em uma câmara de calibração. A Tabela 3 apresenta as especificações do equipamento quanto as suas situações de uso. O DHT22, representado na Figura 17, foi utilizado como elemento de medição de temperatura e umidade para o cenário de avaliação.

Característica	Valor
Alimentação	3V3 a 6V (DC)
Elemento sensor	Capacitor de polímero
Range de Umidade	0 – 100%
Range de Temperatura	40 °C – 80 °C

Tabela 3 – Especificações do Sensor. Fonte: Própria.

O ESP8266 é capaz de processar dados oriundos de sensores e enviá-los por meio do protocolo supracitado. O ESP8266, segundo Kolban (2016) é um microcontrolador que apresenta um circuito de radiofrequência em 2.4GHz interno. Além de ser um *System-On-Chip* (SOC) que contém barramento geral de entradas e saídas (do inglês GPIOs), Interface Serial de Circuito Inter-Integrado (do inglês I2C) e Interface Serial Periférica (do inglês SPI), Receptor/Transmissor Universal Assíncrono (do inglês UART), entrada de Conversor Analógico-Digital (do inglês ADC) e saídas de Modulação por Largura de Pulso (do inglês PWM); conforme ilustrou Curvello (2021). O

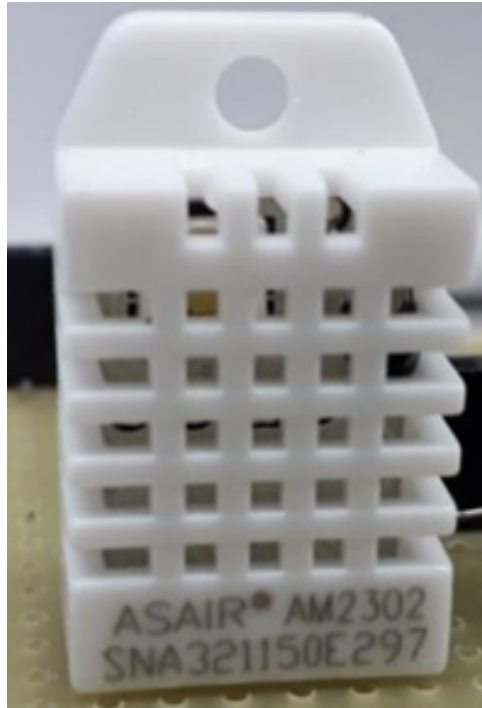


Figura 17 – Sensor DHT 22. Fonte: Própria.

ESP8266, representado na Figura 18, corresponde ao microcontrolador responsável por interpretar os dados dos sensores supracitados e transmitir aos demais transdutores.



Figura 18 – ESP8266. Fonte: Própria.

O CI TP4056 foi desenvolvido por Nanjing Top Power ASIC Corp (2015) e corresponde a um instrumento completo que é utilizado como carregador linear de corrente e tensão constantes capaz de efetuar a recarga de uma única célula de lítio-íon e apresenta aplicações como: Compôr circuito de bateria de aparelhos celulares, equipamentos de geolocalização por GPS, câmeras e carregadores USB. O equipamento apresenta suas especificações descritas na Tabela 4. O TP4056, representado na Figura 19, fez parte do circuito de carga de baterias dos transdutores elaborados nesse

estudo.



Figura 19 – TP4056. Fonte: Própria.

Parâmetro	Especificação
Tensão de entrada	0,3V a 8V
TEMP	0,3V a 10V
CE	0,3V a 10V
Duração em curto-circuito	Contínua

Tabela 4 – Especificações do CI TP4056. Fonte: Própria.

A bateria 18650, conceituado por EEMB (2010) é uma célula recarregável do tipo lítio-íon que apresenta 2550mA de capacidade típica (2600mA nominal). Os autores do estudo[14] informam que as baterias de lítio-íon vêm se destacando dentre as tecnologias promissoras na aplicação de detecção de gases. Isso deve-se a sua elevada densidade de energia e de potência; ao baixo ciclo de recarga, elevada vida útil e por requisitar pouca manutenção. A Tabela 5 apresenta as especificações básicas da célula de recarga supracitada; retiradas da folha de dados do componente. O equipamento representado pela Figura 20 e supracitado foi utilizado como instrumento fornecedor de energia aos transdutores que fizeram parte da rede elaborada e proposta pelo estudo.



Figura 20 – Bateria 18650. Fonte: Própria.

Característica	Valor
Capacidade	2550mA
Tensão Nominal	3,7V
Impedância Nominal	Abaixo de 70mili-ohms
Tensão Máxima de Carga	4,20V
Corrente de Carga Padrão	0,52A
Corrente de Carga Rápida	1,3A

Tabela 5 – Especificações da Bateria 18650. Fonte: Própria.

4.4.2 Transdutor Inteligente Versão II

O Transdutor Inteligente Versão II (21) foi elaborado de acordo com a proposta apresentada por Catini et al. (2019). De modo que o dispositivo é composto pelos sensores: SHT31, TSL2561, SGP30 e BME680. Além disso, o equipamento apresenta como componente de processamento o ESP32. O presente subcapítulo tem por objetivo descrever os elementos do transdutor, cuja escolha deu-se em virtude dos artigos estudados, o preço, a facilidade de aquisição e a viabilidade para processar sinais temporais tão pequenos quanto o índice de voláteis emitidos por plantas.

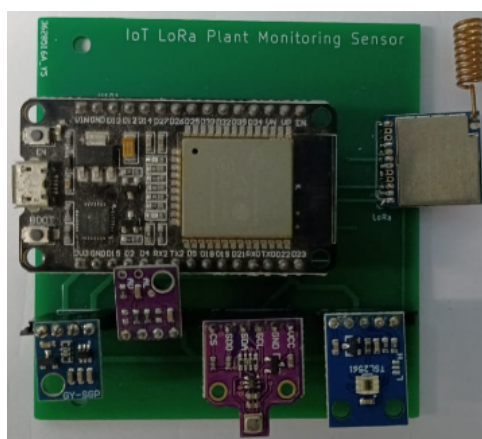


Figura 21 – Transdutor Inteligente II. Fonte: Própria.

Espressif (2023) informou que o ESP32 corresponde a um chip combinado de WiFi e Bluetooth de 2,4 GHz projetado com o objetivo de atender a demanda de aplicações IoT. O chip foi projetado para obter o melhor desempenho de potência de RF, mostrando robustez, versatilidade e confiabilidade em uma ampla variedade de aplicações e cenários de consumo de energia. O ESP32 foi projetado para dispositivos móveis, eletrônicos vestíveis e aplicações de IoT. Esse chip apresenta características de chips de baixa potência, incluindo clock gating de ajuste fino, vários modos de economia

de energia e escala de potência dinâmica. Por exemplo, em um cenário de aplicativo de hub de sensores IoT de baixa potência, o ESP32 é ativado periodicamente apenas quando uma condição especificada é detectada. O ciclo de trabalho de baixo consumo pode ser usado para minimizar a quantidade de energia que o chip gasta. A saída do amplificador de potência também é ajustável, contribuindo assim para uma compensação ideal entre alcance de comunicação, taxa de transferência de dados e consumo de energia. A Figura 22 apresenta o diagrama de blocos do ESP32.

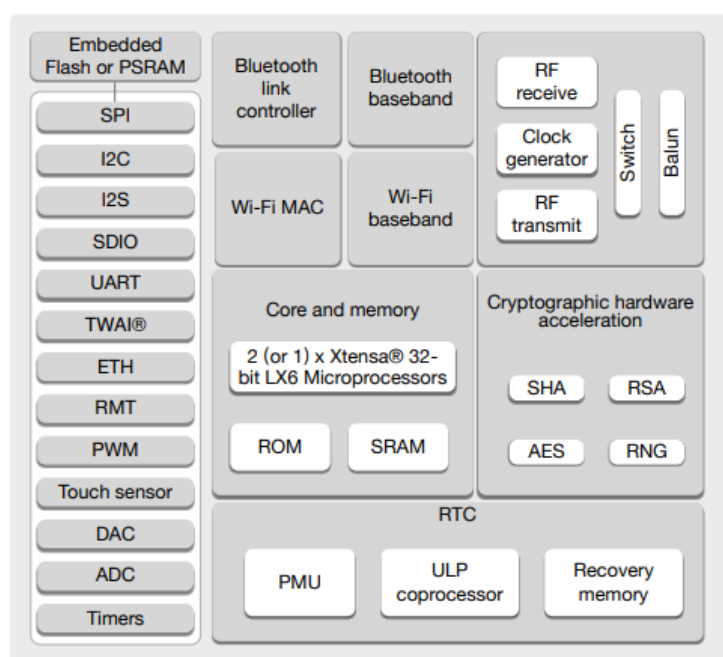


Figura 22 – Diagrama de Blocos do ESP32. Fonte: Espressif (2023)

O ESP32 integra um interruptor de antena, amplificador de potência, amplificador de recepção de baixo ruído, filtros, e módulos de gerenciamento de energia. Além disso, usa Semicondutor de Metal-Óxido (do inglês CMOS) para rádio e apresenta largura de banda totalmente integrada em um chip único; bem como, integra recursos avançados de circuitos de calibração que permitem que a solução remova as imperfeições do circuito externo ou se ajuste às mudanças nas condições externas. O ESP32 suporta memória flash externa. Além disso, o microcontrolador apresenta um coprocessador Ultra Baixo Consumo (do inglês ULP). O coprocessador ULP e a memória RTC permanecem ligados durante o modo de hibernação. Desse modo, o desenvolvedor pode armazenar um programa para o coprocessador ULP na memória lenta do Relógio de Tempo Real (do inglês RTC) para acessar dispositivos periféricos, temporizadores internos e sensores internos durante o modo supracitado. Isso é útil para

projetar aplicativos em que a Unidade de Processamento Central (do inglês CPU) precisa sofrer *weakup* por um evento externo, um temporizador ou uma combinação dos dois, mantendo o consumo mínimo de energia.

A Sensirion (2021) descreveu o SHT31 (Figura 23) como sendo um sensor de umidade e temperatura que utiliza a tecnologia CMOS. Este sensor possui alta precisão e resolução, baixo consumo de energia e é capaz de medir a umidade relativa do ar e a temperatura simultaneamente. O *datasheet* do sensor SHT31 da Sensirion fornece informações detalhadas sobre as características técnicas do dispositivo, incluindo sua faixa de operação, precisão, consumo de energia e especificações de comunicação.

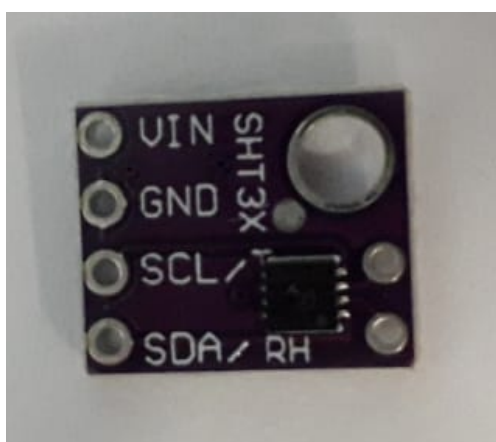


Figura 23 – Sensor SHT31. Fonte: Própria.

A folha de dados do componente apresenta o SHT31 como um sensor de umidade e temperatura digital, projetado e fabricado pela Sensirion. O SHT31 utiliza um elemento sensor capacitivo de última geração para medir a umidade relativa e um termistor de platina para medir a temperatura. O sensor oferece alta precisão, baixo consumo de energia e uma faixa de medição de umidade de 0 a 100% e temperatura de -40°C a 125°C. O SHT31 é um sensor digital que utiliza a interface I2C para comunicação. Ele é capaz de operar em uma ampla faixa de tensão de alimentação, variando de 2,4V a 5,5V. Além disso, o sensor possui um baixo consumo de energia, consumindo apenas 0,15uA em modo de repouso e 0,2mA durante a operação.

O sensor SHT31 é altamente preciso e confiável, apresentando uma precisão típica de $\pm 2\%$ para medições de umidade relativa e $\pm 0,3^\circ\text{C}$ para medições de temperatura. O sensor também é capaz de medir a umidade relativa em ambientes com alta concentração de gases corrosivos, graças ao seu encapsulamento robusto e resistente a produtos químicos. Sensirion (2021) realçou ainda que para facilitar a integração do

sensor em projetos eletrônicos, a Sensirion (2021) oferece uma variedade de pacotes de desenvolvimento, incluindo o kit de avaliação SHT31, que vem com um sensor SHT31 e um módulo de avaliação para facilitar a prototipagem. Já a medição da qualidade do ar foi realizada por meio do sensor BME680, descrito abaixo. O sensor BME680 (Figura 24) é capaz de mensurar níveis de temperatura e capaz de detectar gases tóxicos, como dióxido de carbono e monóxido de carbono, além de medir a temperatura e umidade do ar. Com a utilização de uma tecnologia de aquecimento integrada, é possível reduzir a influência da umidade ambiente nas medições. O sensor opera com uma ampla faixa de tensão de alimentação, o que o torna compatível com diferentes sistemas embarcados. As informações detalhadas sobre as características elétricas e mecânicas do BME680 podem ser encontradas na folha de dados disponibilizada pela BOSCH.

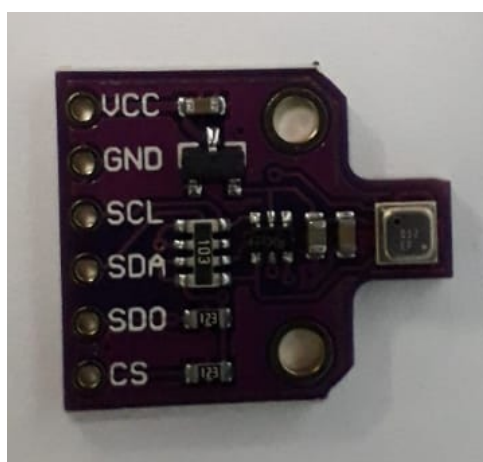


Figura 24 – Sensor BME680. Fonte: Própria.

O BME680, segundo BOSCH (2017), é um sensor de gás integrado de alta precisão fabricado pela Bosch Sensortec. O BME680 é capaz de medir a qualidade do ar interno e externo, bem como as concentrações de vários gases, incluindo dióxido de carbono, dióxido de nitrogênio, ozônio e outros gases voláteis orgânicos (COVs). O sensor corresponde a um componente eletrônico avançado que usa uma combinação de tecnologias para obter uma precisão e estabilidade excepcionais.

O BME680 usa uma combinação de CMOS com sensor de aquecimento de microestrutura integrado (do inglês MEMS) para medir as concentrações de gases. O sensor também inclui um sensor de temperatura e umidade para fornecer informações adicionais sobre a qualidade do ar. Além disso, o BME680 tem um baixo consumo de energia e uma ampla faixa de operação, tornando-o adequado para uma variedade

de aplicações. O sensor pode ser utilizado em várias aplicações, incluindo sistemas de controle de qualidade do ar interno, sistemas de monitoramento ambiental e dispositivos de medição de qualidade do ar portáteis. Ele também pode ser usado em conjunto com outros sensores, como sensores de partículas e sensores de radiação, para fornecer uma visão mais abrangente da qualidade do ar.

A medição do índice de lux foi realizada com base nos dados obtidos do sensor TLS2561. A AMS (2013) relatou que o sensor TSL2561, Figura 25, é um sensor de luz digital capaz de medir a intensidade de luz em uma ampla faixa de iluminação. O sensor pode ser utilizado em diversas aplicações, como em sistemas de monitoramento de luminosidade em ambientes internos e externos. De acordo com a folha de dados fornecida pela Adafruit, o TSL2561 é um dispositivo de baixo consumo de energia, o que o torna adequado para uso em dispositivos alimentados por bateria.



Figura 25 – Sensor TSL 2561. Fonte: Própria.

O TSL2561 é um sensor de alta precisão que permite medir a luminosidade ambiente de forma eficiente. O sensor consiste em um fotodiodo que converte a luz em corrente elétrica e um amplificador que amplifica o sinal do fotodiodo. O TSL2561 possui duas áreas de detecção de luz, uma para luz visível e outra para luz infravermelha, permitindo a medição de ambos os espectros. O sensor é capaz de medir a luz ambiente em uma faixa de 0,1 a 40000lx com resolução de 0,1lx, o que o torna um sensor de alta precisão. O TSL2561 também é capaz de operar em uma ampla faixa de temperatura, de -40 °C a 85 °C, o que o torna adequado para diversas aplicações.

Para operar o sensor supracitado, é necessário alimentá-lo com uma tensão entre 2,7V e 3,6V e estabelecer uma comunicação por meio de protocolo I2C. O sensor possui um registrador de controle que permite configurar a taxa de amostragem, o modo

de operação e outras configurações. O TSL2561 é amplamente utilizado em aplicações de iluminação e controle de brilho, como em monitores de ambiente de escritório, aparelhos de ar condicionado e sistemas de iluminação automática. Ele também é utilizado em aplicações de segurança, como câmeras de segurança e sistemas de monitoramento de incêndio. O sensor utilizado para adquirir concentrações de COVs foi o SGP30, descrito abaixo.

A Sensirion (2021) descreveu o SGP30, Figura 26, como sendo um sensor de qualidade do ar tipo CMOS que mede a concentração de CO₂ e COVs. O sensor é usado para detecção de gás e possui um algoritmo de compensação de temperatura e umidade integrado para aumentar a precisão das medições. O sensor é projetado para ser de baixo consumo de energia e tem uma vida útil de até 15 anos. Através da interface I2C, o sensor pode enviar dados de concentração de CO₂ e COV para microcontroladores, microprocessadores e outros dispositivos eletrônicos. Além disso, a instituição ainda afirmou que o sensor foi projetado para fácil integração em processadores embarcados e usado para aplicações IoT.



Figura 26 – Sensor SGP30. Fonte: Própria.

O elemento sensor apresenta uma robustez inigualável contra gases contaminantes presentes no mundo real aplicações que permitem uma estabilidade única a longo prazo e baixo consumo energético. A Figura 27, retirada da folha de dados do SGP30, representa o diagrama de blocos do sensor. As recomendações de uso do SGP30, informadas pela Sensirion (2021), comprovam que o sensor apresenta melhor desempenho quando operado dentro da faixa normal recomendada de temperatura e umidade de 5 – 55 °C e 4 – 20 g/m³, respectivamente. A exposição prolongada a condições fora da faixa recomendada, especialmente em alta umidade, pode afetar o desempenho do sensor. Exposição prolongada em condições extremas podem diminuir a vida útil do

sensor. Além de CO₂ e de tCOV, é possível medir concentrações de H₂ e de Etanol.

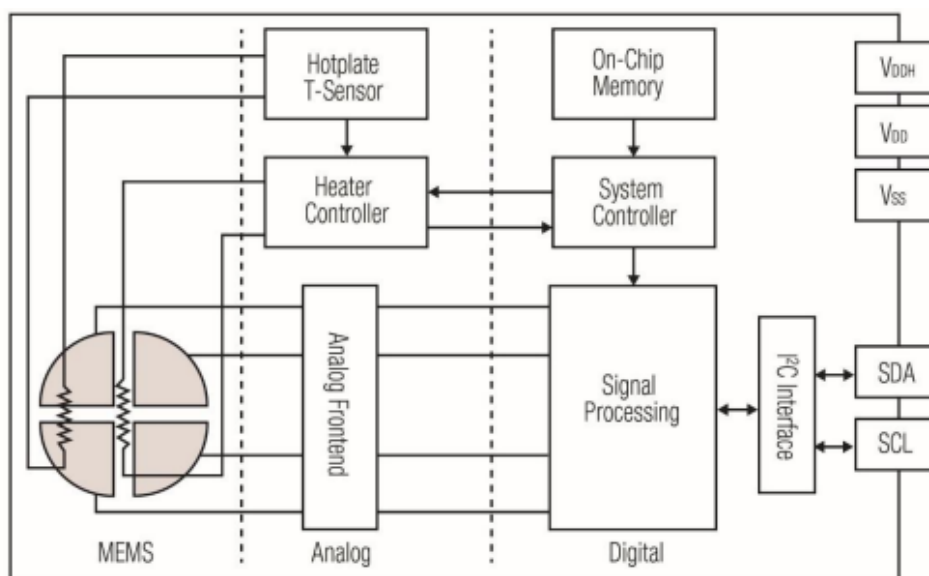


Figura 27 – Diagrama de blocos do SGP30. Fonte: Sensirion (2021)

O SGP30 utiliza uma tecnologia patenteada de compensação de COV que garante alta precisão e confiabilidade das medições. Além disso, o sensor possui um tempo de resposta rápido e uma longa vida útil, com uma estabilidade de sinal de longo prazo superior a 10 anos. Essas características fazem do SGP30 uma excelente escolha para aplicações em que é necessário um monitoramento preciso e contínuo da qualidade do ar.

O SGP30 pode ser integrado a uma variedade de sistemas de controle, incluindo microcontroladores e sistemas de controle de autônomo. O sensor possui um protocolo de comunicação I2C padrão que facilita sua integração em sistemas eletrônicos. Além disso, o SGP30 é compatível com a maioria dos níveis de tensão, o que torna sua integração mais fácil em uma variedade de sistemas. Ao utilizar o sensor SGP30 em projetos, é importante entender as especificações do dispositivo. O Sensirion (2021) forneceu informações detalhadas sobre o funcionamento do sensor, bem como sobre as condições de operação recomendadas, como faixa de temperatura e umidade. Além disso, a folha de dados do sensor fornece informações importantes sobre a calibração do dispositivo e sobre como interpretar os dados de saída.

O sensor utiliza um algoritmo de compensação de linha de base dinâmica e parâmetros de calibração para fornecer dois sinais de qualidade do ar complementares. Com base nos sinais do sensor, um sinal total de COVs (tCOV) e um sinal equivalente de CO₂ (CO₂eq) são calculados. O processo de medição da qualidade do ar é

iniciado com o comando "Init_air_quality". Após esse comando, é necessário enviar o comando "Measure_air_quality" em intervalos regulares de 1 segundo para garantir o correto funcionamento do algoritmo de compensação de linha de base dinâmica.

O sensor responde com 2 bytes de dados (bit mais significativo primeiro) e 1 byte de Código de Correção de Erros (do inglês CRC) para cada um dos dois sinais pré-processados de qualidade do ar na ordem CO₂eq (ppm) e tCOV (ppb). Nos primeiros 15 segundos após o comando "Init_air_quality", o sensor está em uma fase de inicialização, durante a qual o comando "Measure_air_quality" retorna valores fixos de 400 ppm de CO₂eq e 0 ppb de tCOV.

O SGP30 também oferece a possibilidade de ler e gravar os valores de linha de base do algoritmo de correção de linha de base. Essa função é usada para salvar a linha de base em intervalos regulares em uma memória externa não volátil e restaurá-la após uma nova inicialização ou redefinição do sensor. O comando "Get_baseline" retorna os valores de linha de base para os dois sinais de qualidade do ar. O sensor responde com 2 bytes de dados (bit mais significativo primeiro) e 1 byte de CRC para cada um dos dois valores na ordem CO₂eq e TCOV. Esses dois valores devem ser armazenados em uma memória externa. Após uma inicialização ou redefinição, a linha de base do algoritmo de correção de linha de base pode ser restaurada enviando primeiro um comando "Init_air_quality", seguido de um comando "Set_baseline" com os dois valores de linha de base como parâmetros na ordem (tCOV, CO₂eq).

O sensor possui uma compensação de umidade embutida para os sinais de qualidade do ar (CO₂eq e TCOV) e os sinais brutos do sensor (sinal de H₂ e sinal de etanol). Para usar a compensação de umidade embutida, é necessário fornecer um valor de umidade absoluta de um sensor de umidade externo, como o SHT31. Usando o comando "Set_humidity", um novo valor de umidade pode ser gravado no SGP30, enviando 2 bytes de dados (MSB primeiro) e 1 byte de CRC. Os 2 bytes de dados representam os valores de umidade como um número fixo de 8,8 bits, com um valor mínimo de 0x0001 (= 1/256 g/m³) e um valor máximo de 0xFFFF (255 g/m³ + 255/256 g/m³). Por exemplo, o envio de um valor de 0x0F80 corresponde a um valor de umidade de 15,50 g/m³ (15 g/m³ + 128/256 g/m³).

Após definir um novo valor de umidade, esse valor será usado pelo algoritmo de compensação de umidade embutido até que um novo valor de umidade seja definido usando o comando "Set_humidity". Reiniciar o sensor (ligar ou redefinir) ou enviar

um valor de 0x0000 (= 0 g/m³) define o valor de umidade usado para compensação para o seu valor padrão (0x0B92 = 11,57 g/m³) até que um novo valor de umidade seja enviado. Enviar um valor de umidade de 0x0000 pode ser usado para desligar a compensação de umidade.

4.5 RESUMO DO CAPÍTULO

O presente capítulo visou orientar o leitor acerca das metodologias aplicadas nos testes e experimentos do projeto, com foco na validação de métodos de desenvolvimento de WSNs em ambientes agrícolas. Inicialmente, foram apresentadas as classificações da pesquisa, destacando-se sua natureza aplicada e descritiva, bem como a abordagem de pesquisa de campo adotada para coletar dados diretamente no ambiente estudado. O universo e a amostra foram definidos, compreendendo os equipamentos de emissão e recepção de sinais de radiofrequência, com ênfase nos sensores inteligentes desenvolvidos ao longo da pesquisa.

A metodologia da experimentação abrangeu uma série de testes funcionais para avaliar a capacidade dos sensores em detectar variações ambientais e padrões temporais na emissão de substâncias voláteis pelas plantas. Experimentos adicionais foram conduzidos em uma estufa inteligente, explorando diferentes cenários para avaliar o impacto das plantas e da iluminação na qualidade do ar. O desenvolvimento dos nós-sensores foi detalhado em duas versões, com foco no processamento de dados ambientais e de compostos orgânicos voláteis. Os firmwares desenvolvidos incorporaram estratégias distintas para a transmissão de dados, incluindo o uso de redes mesh e solicitações HTTP. A recepção e análise dos dados foram realizadas por meio de requisições HTTP POST, processadas em uma planilha Google Sheets e avaliadas utilizando algoritmos Python no Google Colaboratory. Essas metodologias proporcionaram uma análise abrangente e eficiente dos dados coletados, contribuindo para a validação dos métodos de desenvolvimento de WSNs em ambientes agrícolas. O próximo capítulo traz mais detalhes acerca do desenvolvimento dos dispositivos e da configuração dos experimentos introduzidos acima. Além disso, apresentou-se os métodos e processos que envolveram a construção dos sensores inteligentes.

O Transdutor Inteligente Versão I foi desenvolvido com a finalidade de verificar a capacidade de reação do CCS811 a cenários de umidade elevada; bem como cons-

truir o esqueleto de uma rede mesh de sensores. O Transdutor Inteligente Versão II, teve por objetivo avaliar a capacidade de sensores de qualidade do ar de baixo custo distintos (SGP30 e BME680) em detectar a presença de uma planta do tipo arruda por meio do sinal de COV por ela emitido. Desse modo, foi utilizado este sensor para elaborar séries históricas de dados dos sensores quando submetidos nos cenários de observação supracitados. Além disso, também foi possível traçar o perfil rítmico de COVs utilizando processamento em alto nível (Python).

5 DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo tem por objetivo esclarecer ao leitor o processo de desenvolvimento dos sensores utilizados no projeto de pesquisa; bem como descrever o processo de *setup* dos experimentos previamente descritos. O capítulo realiza uma apresentação minuciosa dos aspectos de hardware e de *firmware* utilizados para elaborar os sensores; bem como suas instalações em cada cenário observado.

O transdutor inteligente versão dois foi construído de forma tal a operar tanto de maneira individual como em rede mesh IoT, aliado a demais sensores, formando uma malha de nós interconectados. Desse modo, construiu-se dois *firmwares* para realizar os experimentos propostos.

5.1 DESENVOLVIMENTO DOS *FIRMWARES*

Conforme supracitado, o subcapítulo tem por objetivo descrever o processo utilizado para a elaboração dos *firmwares* que regiram o funcionamento dos transdutores elaborados ao longo da pesquisa. Desse modo, o *Firmware Versão I* fora utilizado no Transdutor Inteligente Versão I. Enquanto que os demais *firmwares* foram utilizados no Transdutor Inteligente Versão II. É válido realçar que as redes mesh desenvolvidas ao longo da pesquisa utilizaram como base a biblioteca de funções denominada PainlessMesh e descrita por Martín (2019).

O PainlessMesh é uma biblioteca que simplifica a criação de redes mesh utilizando hardware ESP8266 e ESP32. O objetivo é permitir que os programadores trabalhem com redes mesh sem a preocupação detalhada sobre a estrutura ou o gerenciamento da rede. Esta rede ad-hoc elimina a necessidade de planejamento, controle central ou roteador. Qualquer sistema com um ou mais nós se organiza automaticamente em uma malha totalmente funcional, cujo tamanho máximo é limitado pela quantidade de memória alocada para o *buffer* de sub conexões.

A comunicação no PainlessMesh é baseada em objetos JSON, tornando as mensagens legíveis e fáceis de entender. Essa abordagem facilita a integração com front-ends JavaScript, aplicações web e outros aplicativos, embora com alguma perda de desempenho, que poderia ser mitigada por contribuições que implementem mensa-

gens binárias.

Projetado para uso com Arduino, o `painlessMesh` não utiliza as bibliotecas WiFi padrão devido a problemas de desempenho, optando por aproveitar as bibliotecas nativas ESP32 e ESP8266 SDK, disponíveis no Arduino IDE. O `painlessMesh` não estabelece uma rede TCP/IP, sendo que cada nó é identificado exclusivamente pelo seu chipId de 32 bits. É importante mencionar que a biblioteca respeita o roteamento AODV. No entanto, é preciso evitar o uso da função `delay()` para garantir a estabilidade da malha. A recomendação é empregar o `TaskScheduler`, utilizado internamente pelo `painlessMesh`.

Outras precauções incluem ser conservador no número de mensagens transmitidas por minuto para evitar sobrecarga de hardware. Devido ao tráfego intenso, mensagens podem ser perdidas, e a biblioteca não garante a entrega de todas as mensagens. Estratégias como reenvio periódico ou envio de respostas podem ser adotadas para contornar essas situações.

5.1.1 *Firmware Versão I*

Conforme ilustrado acima, o Transdutor Inteligente Versão I foi utilizado em testes e experimentos utilizando uma rede mesh entre mais de uma unidade do dispositivo. Dessa forma, é válido relatar que o experimento voltado a testar os limites do CCS811 envolveu o desenvolvimento de uma rede mesh utilizando as notas de Martín (2019). O projeto também envolveu o material de Industries (2023) e de Pennings (2021).

A aplicação da leitura de temperatura e umidade do DHT22 foi construída com base na biblioteca denominada "*Adafruit Unified Sensor Driver*". Muitos sistemas embarcados de pequeno porte existem para coletar dados de sensores, analisar os dados e tomar uma ação apropriada ou enviar esses dados do sensor para outro sistema para processamento. Desse modo, (INDUSTRIES, 2023) elaborou um *driver* único, capaz de facilitar o acesso a leitura de diversos sensores I2C de mercado. Um dos muitos desafios do design de sistemas embarcados é o fato de que as peças usadas hoje podem estar fora de produção amanhã, ou os requisitos do sistema podem mudar, e pode ser necessário escolher um sensor diferente no futuro.

Integrar *drivers* de sensores diversos em sistemas existentes é tanto propenso a erros quanto demorado, uma vez que os sensores raramente usam as mesmas

unidades de medida exatas. Ao reduzir todos os dados para um único tipo e definir unidades do sistema internacional de unidades (SI) específicas e padronizadas para cada família de sensores, os mesmos tipos de sensores retornam valores comparáveis com qualquer outro sensor semelhante. Isso permite alternar modelos de sensores com muito pouco impacto no restante do sistema, o que pode ajudar a mitigar alguns dos riscos e problemas de disponibilidade de sensores e reutilização de código. A camada de abstração de sensor unificado também é útil para registro de dados e transmissão.

Além disso, também utilizou-se a biblioteca "ccs811.h" elaborada por Pennings (2021). Essa biblioteca é específica para plataformas como ESP8266 e ESP32, destinada a monitorar a qualidade do ar. O código-fonte e recursos dessa biblioteca podem ser encontrados no repositório GitHub mantido pelo autor. O documento implementa um *driver* para o sensor CCS811, um módulo de sensor de qualidade do ar com interface I2C. O projeto inclui exemplos práticos, sendo o "ccs811basic" um exemplo inicial simples, útil para garantir a correta conexão dos fios I2C, o pino de seleção (do inglês ADDR) e o pino nWAKE. Além disso, um exemplo mais completo demonstra a leitura dos dados de gás do CCS811. Um recurso adicional presente na biblioteca é o exemplo "ccs811flash", que permite atualizar o *firmware* do sensor CCS811.

O experimento que motivou a elaboração deste *firmware* visou posicionar uma folha de papel queimado ao longo de um plano com dois desses transdutores. De modo que a malha mesh precisou identificar qual dos dois sensores esteve mais próximo do papel queimado; considerando os parâmetros lidos pelo CCS811 e DHT22. Diante destes fatos, os requisitos do desenvolvimento deste projeto podem ser visualizados no Quadro 2. Além disso, também desenvolveu-se o diagrama de casos de uso do sistema, apresentado na Figura 28

A arquitetura do sistema abrange a requisição dos dados do CCS811 e do DHT22 por parte do ESP8266; conexão a rede mesh de nós; transmissão dos dados dos sensores para o outro nó e comparação dos dados adquiridos com os dados do outro nó. É possível entender que o processo de desenvolvimento do *firmware* em questão envolveu a elaboração do diagrama de definição de blocos apresentado na Figura 29 e da máquina de estados presente na Figura 30

Requisito Funcional	Descrição
RF01	Leitura dos dados de COV, CO2, temperatura e umidade
RF02	Busca por outro nó na rede mesh com mesmas chaves de acesso (ID da rede e senha)
RF03	Enviar dados de Temperatura, umidade e COV aos nós presentes na rede mesh
RF04	Ao receber um json de temperatura, umidade, CO2 e COV; comparar com os dados processados em hardware e acender um LED se cada um dos casos abaixo ocorrer: 1. Caso o valor de Temperatura for maior 2. Caso o valor de Umidade for menor 3. Caso a concentração de COV for maior 4. Caso a concentração de CO2 for maior

Quadro 2 – Requisitos Funcionais. Fonte: Própria.

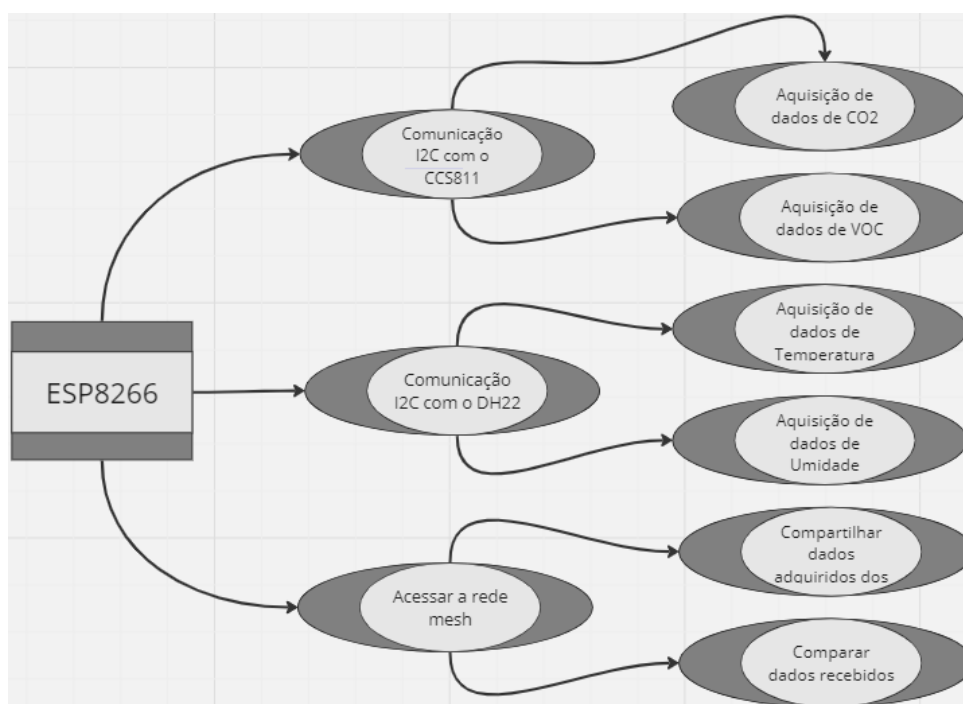


Figura 28 – Diagrama de casos de uso do *Firmware Versão I*. Fonte: Própria.

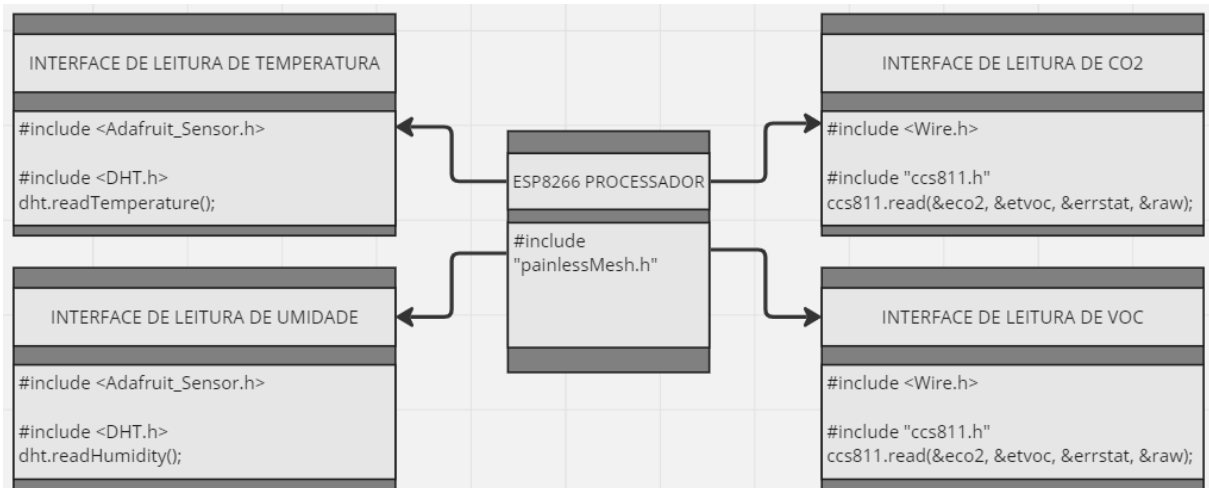


Figura 29 – Diagrama de Blocos do Sistema do *Firmware* Versão I. Fonte: Própria.

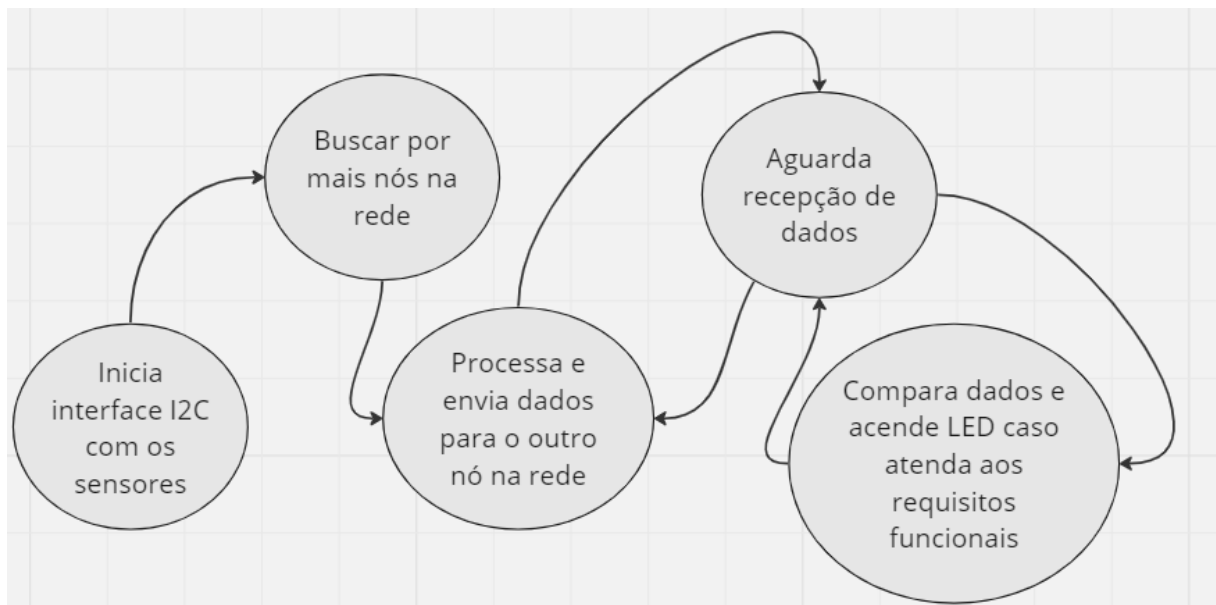


Figura 30 – Máquina de Estados do *Firmware* Versão I. Fonte: Própria.

5.1.2 *Firmware Versão II*

O Transdutor Inteligente Versão II, dentre outras aplicações, foi utilizado com o objetivo de projetar séries temporais dos dados dos sensores BME680, SHT31, TSL2561 e SGP30. Diante desta aplicação, o *Firmware Versão II* visou permitir, ao dispositivo de processamento, o acesso a rede WiFi do Centro de Informática da UFPE (CIN-UFPE) para que envie dados a uma planilha Google Sheets por meio de uma requisição HTTP POST. O arquivo 'HTTPClient.h', utilizado com a finalidade supracitada, é uma biblioteca inicialmente desenvolvida aplicações com o Arduino, criada por Sattler e Copercini (2015). A biblioteca foi posteriormente adaptada para o ESP32. A biblioteca 'HTTPClient.h' proporciona funcionalidades para realizar solicitações HTTP em projetos desenvolvidos para a plataforma Arduino. Visa facilitar o desenvolvimento de aplicações que necessitam de comunicação pela Internet.

O sensor BME680 da Bosch, conforme informado anteriormente, possui capacidades de medição de temperatura, umidade, pressão barométrica, COV e CO₂. Esses parâmetros foram obtidos por meio de comunicação SPI ou I2C utilizando a biblioteca "Adafruit BME680 Library" elaborada por Industries (2023). A "Adafruit SHT31" corresponde a biblioteca de funções utilizada para a elaboração do *driver* de leitura de dados do sensor SHT31. Adafruit SHT31 foi projetada especificamente para funcionar com o SHT31 utilizando a comunicação I2C, sendo necessários apenas dois pinos, definidos pelo programador, para realizar a interface. Válido ressaltar que este documento de código c++ também foi elaborado por Industries (2023). A "*SparkFun TSL2561 Arduino Library*" corresponde a biblioteca utilizada para compor o *driver* de interface I2C utilizado para a leitura dos dados de luminosidade captados pelo TSL2561. Este documento desenvolvido por SparkFun (2018).

O SGP30 da Sensirion é um sensor de ambiente que mede H₂, Etanol no ar. A partir desses números, um algoritmo interno no sensor obtém uma medida equivalente de CO₂ e uma medida de COV. A biblioteca elaborada por Tillaart (2022) e utilizada para compor o *firmware Versão II* possui uma conversão experimental para H₂ e Etanol. As unidades de CO₂ são ppm, as unidades de tCOV são ppb. As unidades de H₂ e Etanol são ppm. Note que para concentrações mais altas, a resolução das medidas diminui, conforme especificado na folha de dados. A biblioteca suporta dois tipos de interfaces, síncrona e assíncrona.

Requisito Funcional	Descrição
RF01	Leitura de dados do sensor BME680 pelo Transdutor Inteligente Versão II
RF02	Leitura de dados do sensor SHT31 pelo Transdutor Inteligente Versão II
RF03	Leitura de dados do sensor TSL2561 pelo Transdutor Inteligente Versão II
RF04	Leitura de dados do sensor SGP30 pelo Transdutor Inteligente Versão II
RF05	Acesso à rede WI-FI do Centro de Informática da UFPE (CIN-UFPE) pelo <i>Firmware</i> Versão II para envio de dados a uma planilha Google Sheets via requisição HTTP POST

Quadro 3 – Requisitos Funcionais do Projeto. Fonte: Própria.

A interface síncrona é bloqueante por até 40 milissegundos, o que foi suficiente para desencadear a implementação de uma interface assíncrona. Os valores de CO₂ e tCOV podem ser lidos até uma vez por segundo (1 Hz). Etanol e H₂, os dados brutos, podem ser amostrados até 40 Hz. Os primeiros 10 segundos o sensor precisa estabilizar. Depois disso, dados reais são obtidos. O SGP30 funciona com barramento I2C a 100 KHz e 400 KHz. Diante das informações apresentadas acima, elaborou-se a Quadro 3 dos Requisitos Funcionais do projeto. O *Firmware* Versão II foi elaborado com base no Diagrama de casos de uso apresentado na Figura 31 e no Diagrama de blocos ilustrado na Figura 32. A máquina de estados que regeu os passos para a elaboração do projeto é apresentada na Figura 33

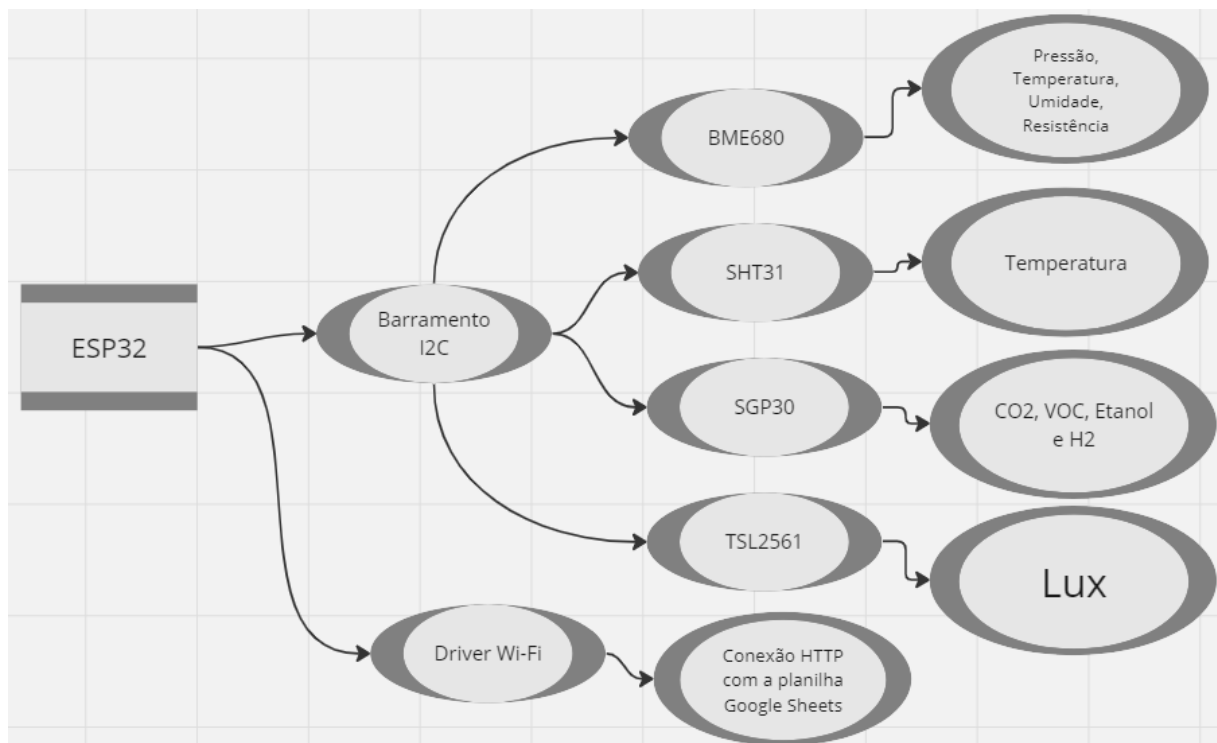


Figura 31 – Bateria de casos de uso do *Firmware Versão II*. Fonte: Própria.

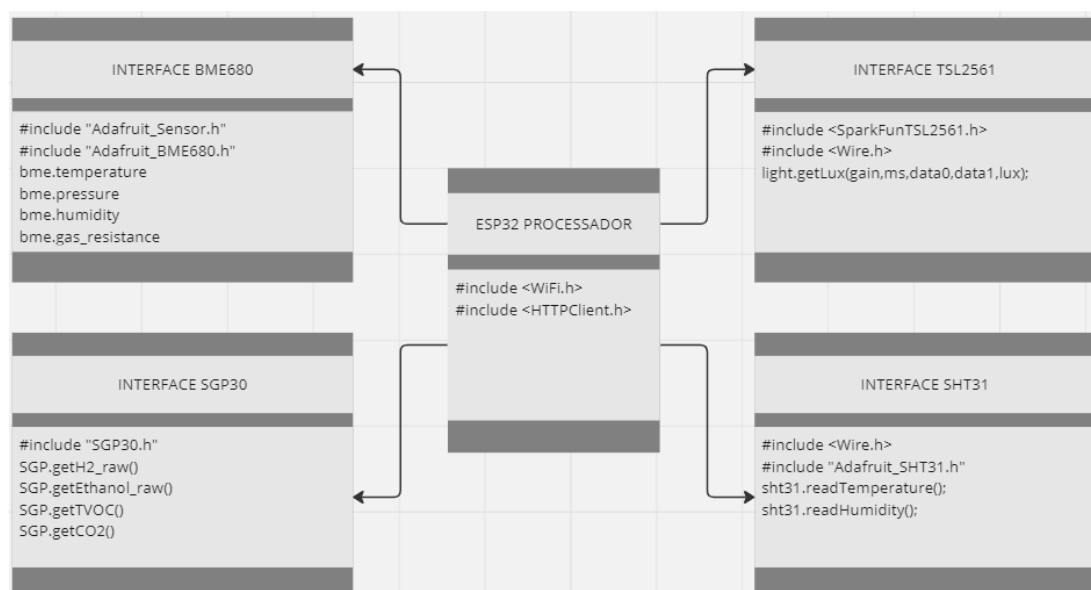


Figura 32 – Diagrama de Blocos do Sistema do *Firmware Versão II*. Fonte: Própria.

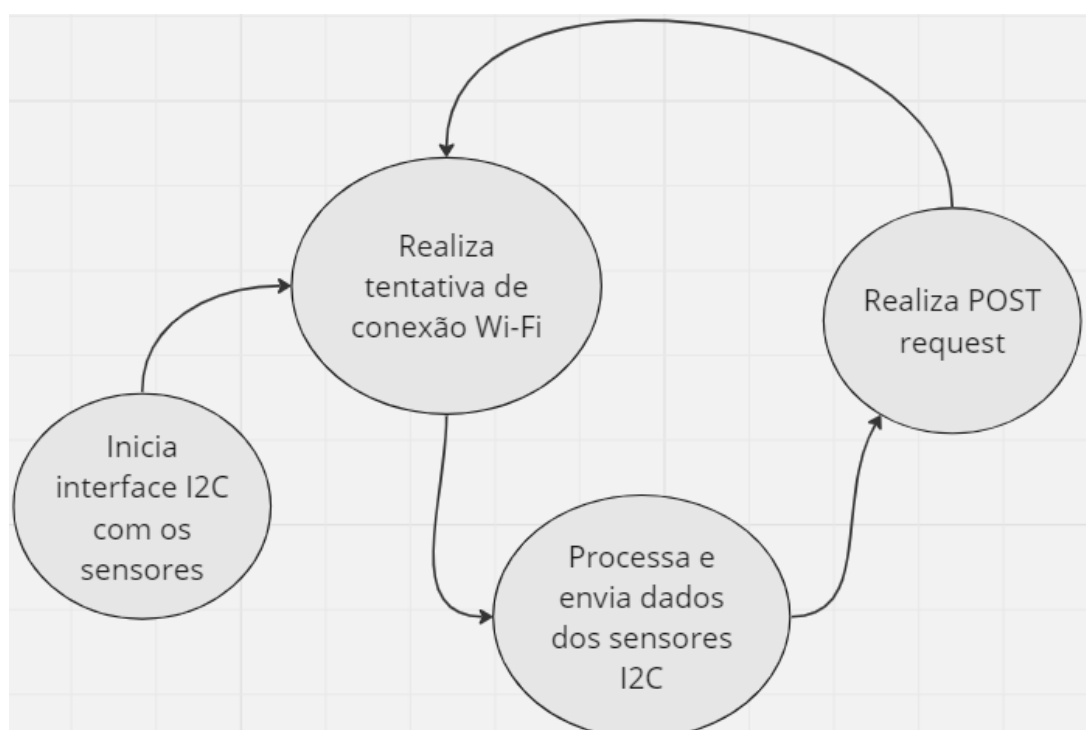


Figura 33 – Máquina de estados do *Firmware* Versão II. Fonte: Própria.

5.1.3 *Firmware* Versão III

O *Firmware* Versão III utilizou dois Transdutores Versão II para estabelecer uma rede mesh e enviar dados a um dispositivo concentrador composto por apenas mais um ESP32. O principal objetivo foi verificar a capacidade dos sensores em perceber a presença da planta em diferentes pontos de uma estufa e avaliar o comportamento das relações entre as variáveis observadas (Temperatura, Pressão, Umidade, Resistência elétrica do BME680, H2, CO2, Etanol e COV). Além disso, buscou-se comparar os sinais temporais e a frequência dos dados de dois transdutores distintos, que compartilhavam a participação na mesma rede mesh. O Nó-raiz da rede mesh teve a função de receber os dados dos demais transdutores e enviá-los via HTTP POST a uma planilha Google Sheets para posterior análise estatística. As bibliotecas previamente descritas e elaboradas por Martín (2019), Pennings (2021). Pennings (2021), Sattler e Copercini (2015), Industries (2023), SparkFun (2018) e Tillaart (2022) foram utilizadas nesse projeto.

Requisito Funcional	Descrição
RF01	Leitura de dados do sensor BME680 pelo Transdutor Inteligente Versão II
RF02	Leitura de dados do sensor SHT31 pelo Transdutor Inteligente Versão II
RF03	Leitura de dados do sensor TSL2561 pelo Transdutor Inteligente Versão II
RF04	Leitura de dados do sensor SGP30 pelo Transdutor Inteligente Versão II
RF05	Estabelecimento de rede mesh entre dois Transdutores Inteligentes Versão II e o Nó-Raíz ESP32
RF06	Envio dos dados de temperatura, umidade e COV aos nós presentes na rede mesh

Quadro 4 – Requisitos Funcionais do *Firmware* Versão III. Fonte: Própria.

A Quadro 4 apresenta os requisitos funcionais do *Firmware* Versão III, onde o RF01, RF02, RF03 e RF04 destacam a aquisição dos dados de cada sensor utilizado. O RF05 aborda o estabelecimento da rede mesh entre os Transdutores Inteligentes. O RF06 refere-se ao envio dos dados dos sensores para os demais nós na rede mesh. O *Firmware* Versão III foi elaborado com base no Diagrama de casos de uso apresentado na Figura 34 e no Diagrama de blocos ilustrado na Figura 35. É importante

notar que os Transdutores regidos pelo *Firmware* Versão III precisaram realizar a participação em uma rede mesh em conjunto com um Nó-raiz cujo *firmware* é explicado no subcapítulo abaixo. A máquina de estados que regeu o desenvolvimento do projeto é representada no diagrama da Figura 36

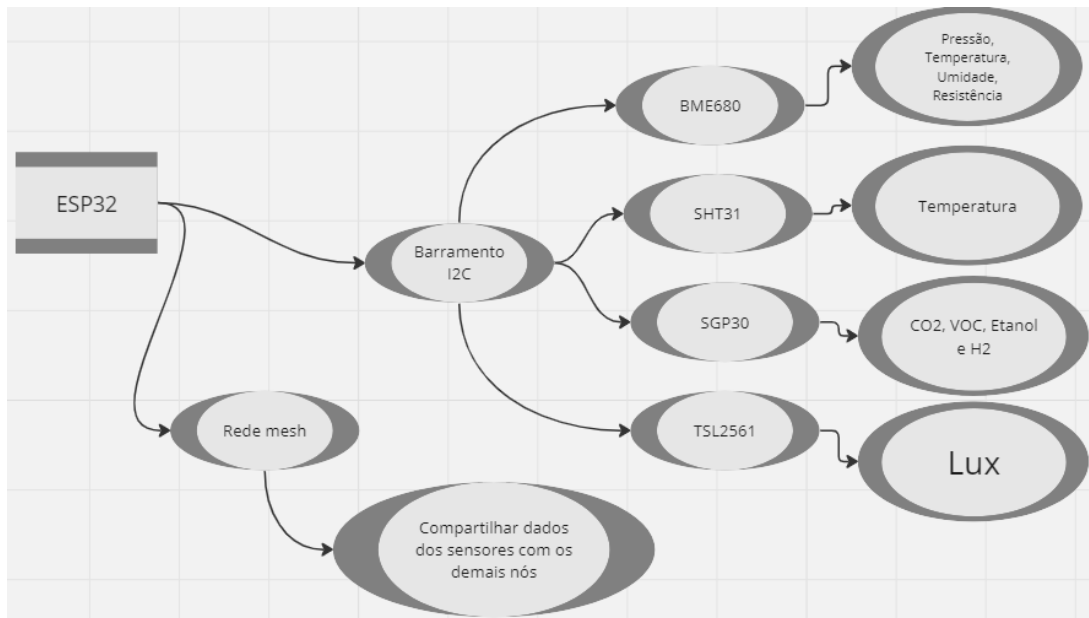


Figura 34 – Diagrama de casos de uso do *Firmware* Versão III. Fonte: Própria.

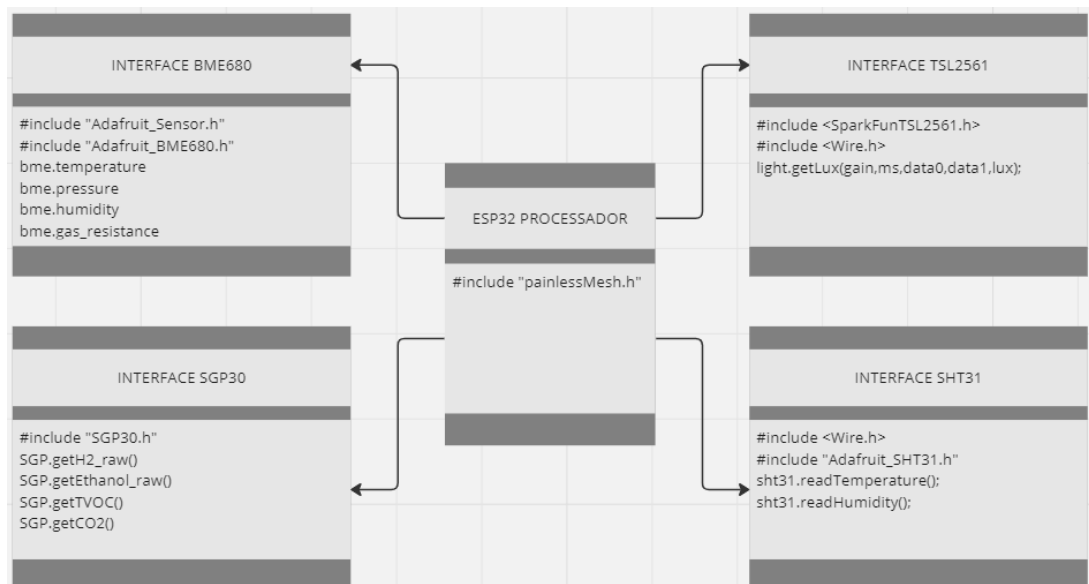


Figura 35 – Diagrama de Blocos do Sistema do *Firmware* Versão III. Fonte: Própria.

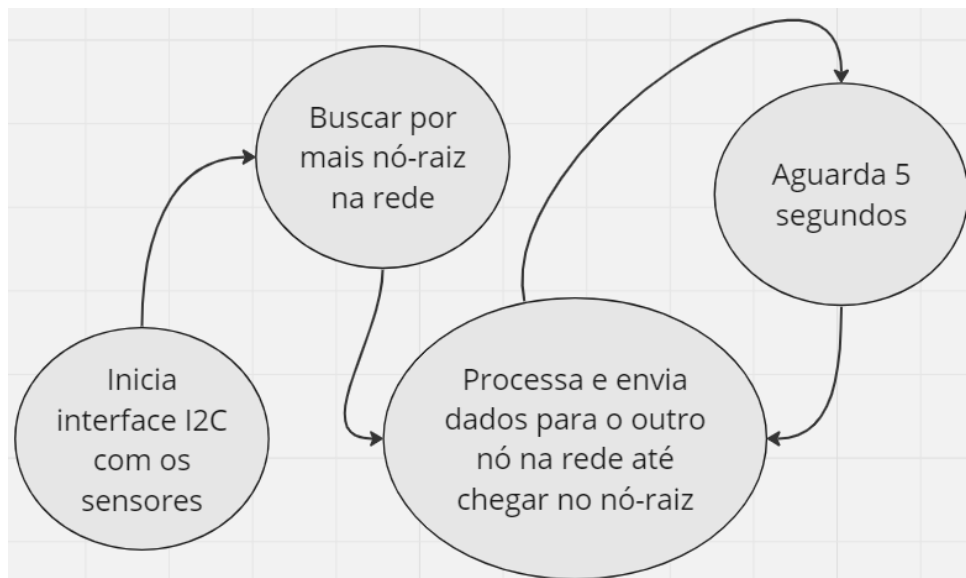


Figura 36 – Máquina de estados do *Firmware* Versão III. Fonte: Própria.

5.1.4 Firmware Nó-raiz

O nó-raiz, conforme supracitado, corresponde a um ESP32 desprovido de sensores e componentes de leitura cuja responsabilidade no projeto envolveu a recepção dos dados dos Transdutores regidos pelo *Firmware* Versão III, por meio da participação na rede mesh cuja biblioteca fora elaborada por Martín (2019), e enviar os dados à planilha Google Sheets utilizando a biblioteca elaborada por Sattler e Copercini (2015). Diante desses fatores; cabe a observação do Quadro 5 de requisitos funcionais. Bem como a Figura 37 que representa o Diagrama de casos de uso, a Figura 38 que ilustra o Diagrama de blocos do sistema e a Figura 39 que representa a Máquina de estados que regeu o desenvolvimento do *firmware*.

Requisito Funcional	Descrição
RF01	Acessar a Rede mesh e aguardar pelos dados enviados pelos Transdutores
RF02	Enviar dados via HTTP POST a planilha Google Sheets

Quadro 5 – Requisitos Funcionais do *Firmware* do Nó-raiz. Fonte: Própria.

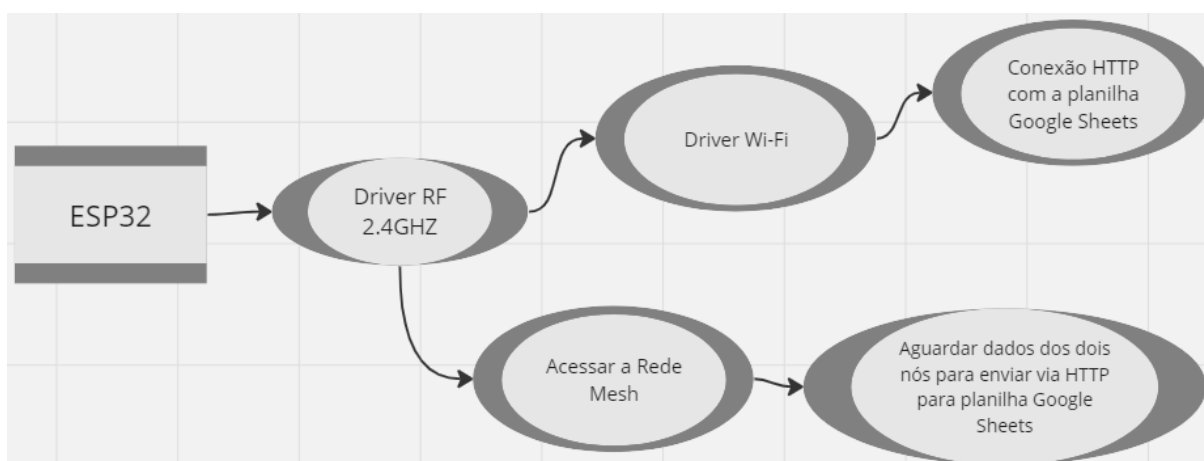


Figura 37 – Diagrama de casos de uso do *Firmware* do Nó-Raiz. Fonte: Própria.

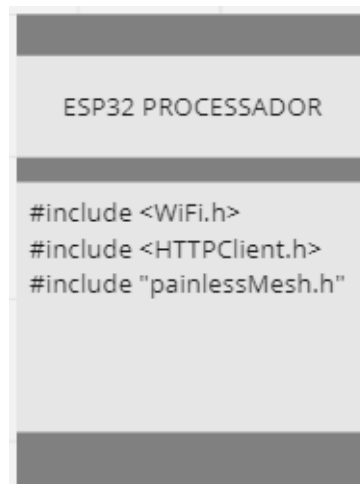


Figura 38 – Diagrama de blocos do *Firmware* do Nó-Raiz. Fonte: Própria.

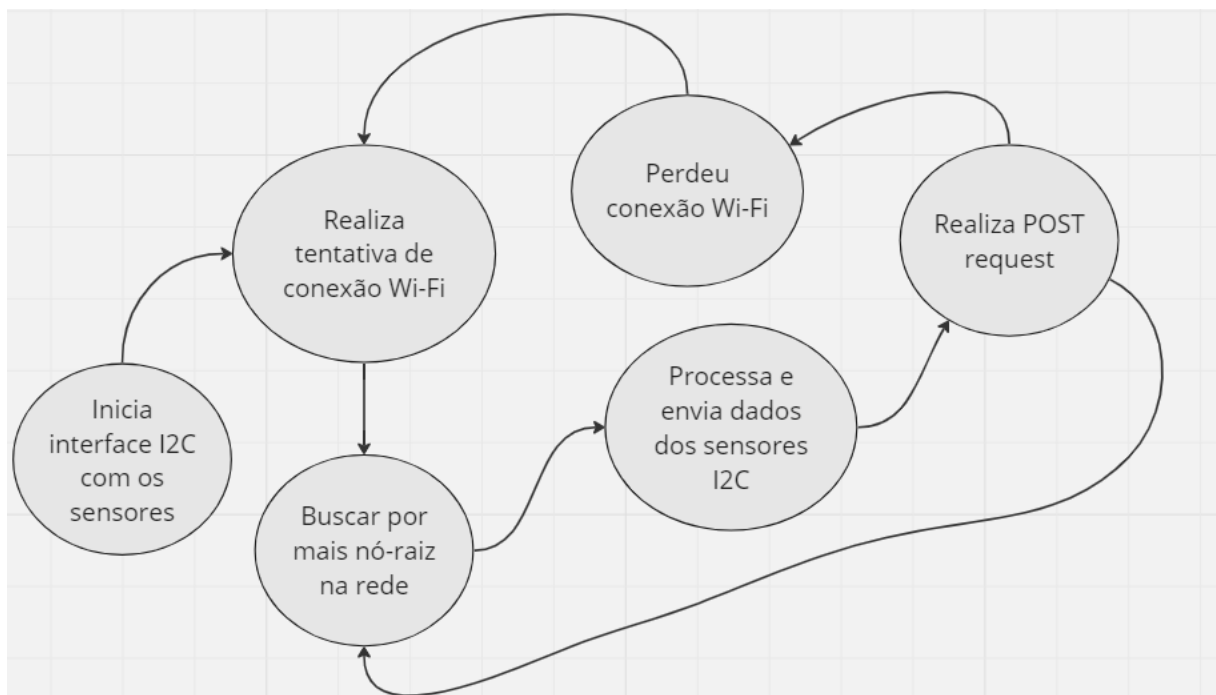


Figura 39 – Máquina de estados do *Firmware* do Nó-Raiz. Fonte: Própria.

5.2 AVALIAÇÃO DOS DADOS

O presente subcapítulo tem como objetivo esclarecer o processo em que os dados, oriundos dos Transdutores descritos acima, são armazenados e tratados. Desse modo, é válido realçar que, por meio da requisição HTTP POST, os dados são recebidos pelo arquivo JavaScript presente no Apêndice E. Dessa forma, passam a ser visualizados em planilha como a apresentada na Figura 40. Após o armazenamento ser realizado; os dados podem ser baixados localmente para avaliação estatística.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
data	hora	tempBME	humBME	pressBME	tlsLUX	tempSHT31	co2SGP	sgpTVOC	resBME	sgpH2	sgpEthanol
18/09/2023	20:51:26	30.20	55.60	1015.96	44.00	28.44	432.00	3.00	87.09	13982.00	19452.00
18/09/2023	20:52:07	30.86	51.64	1016.00	55.00	28.53	416.00	4.00	193.59	13992.00	19469.00
18/09/2023	20:53:12	31.21	50.42	1015.98	53.00	28.64	404.00	3.00	263.50	14013.00	19491.00
18/09/2023	20:54:57	31.20	48.59	1016.02	58.00	28.79	400.00	8.00	370.37	14021.00	19514.00
18/09/2023	20:55:21	31.22	48.43	1016.04	55.00	28.81	400.00	0.00	374.57	14025.00	19505.00
18/09/2023	20:56:02	31.28	48.12	1016.04	51.00	28.85	400.00	4.00	404.96	14025.00	19513.00
18/09/2023	20:57:55	31.48	47.17	1016.04	35.00	29.11	520.00	33.00	439.39	13927.00	19492.00

Figura 40 – Exemplo de Planilha de dados gerados pelos sensores. Fonte: Própria.

O processo avaliativo deu-se por meio de algoritmos escritos em Python utilizando a plataforma Google Colaboratory. A escolha da plataforma deu-se devido ao fato da facilidade de acesso aos recursos estatísticos que a linguagem Python permite; bem como a possibilidade de armazenamento dos arquivos em nuvem e processamento de apenas trechos específicos do código; ou de todo o documento.

Após armazenado os dados; estes passaram pelo processo de corte histórico. Nesta etapa, utilizou-se o algoritmo presente no Apêndice F para cortar os dados em datas específicas (escolhidas de acordo com a data de início e término do experimento) e gerar um novo subconjunto dos dados. Este subconjunto dos dados então foi inserido como entrada do algoritmo presente no Apêndice G por onde inferências estatísticas foram realizadas. Este processo pode ser observado graficamente no diagrama da Figura 41



Figura 41 – Etapas da Avaliação dos dados. Fonte: Própria.

5.3 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

O presente item do capítulo tem por objetivo descrever o processo de como cada experimento fora elaborado. Considerando aspectos de organização do ambiente, período e dispositivo transdutor (I ou II) utilizados.

5.3.1 Impacto do Posicionamento da Fonte de Sinal utilizando o CCS811

O experimento foi realizado utilizando dois Transdutores Inteligentes Versão I com o *Firmware* Verão I. De modo que os medidores acendia o LED de uma dada grandeza sempre que esta excedesse em “X” unidades da medida em relação ao parâmetro recebido via rede *mesh*. Onde o valor de “X” é expresso na Tabela 6.

Coluna 1	Coluna 2
Temperatura	+ 50°C
Humidade	- 30%
CO2	+ 500ppm
VOC	+ 500ppm

Tabela 6 – Valores limiares que promovem a indicação visual dos LEDs

Dessa forma, utilizou-se uma fonte que promovesse aumento de CO₂, temperatura, VOC e diminui-se a umidade. Nesse contexto, foi adicionada uma folha de papel A4 queimando. Realizou-se os testes descritos abaixo. Note que a Figura 42 representa ativação de LEDs acionados por sinais que excedem os valores limiares dependendo da posição de fonte: Perto da esquerda (a), Perto da direita (b), Meio (c), Extrema esquerda (d), Extrema direita (e), Aproximação pela direita.



(a) Teste A.1



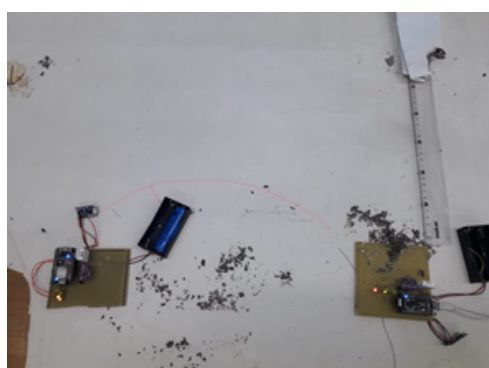
(b) Teste B.1



(c) Teste C.1



(d) Teste D.1



(e) Teste E.1



(f) Teste F.1

Figura 42 – Impacto do Posicionamento da Fonte de Sinal utilizando o CCS811. Fonte: Própria.

O experimento foi realizado para investigar a capacidade de detecção e resposta do CCS811 em um ambiente com fonte de calor extrema. Especificamente, a necessidade de entender como o posicionamento da fonte de sinal afeta a capacidade da rede de detectar e distinguir entre diferentes fontes de emissão. Outro objetivo visou avaliar a capacidade da rede de detectar e distinguir entre diferentes fontes de emissão, dependendo do posicionamento da fonte de sinal. Supôs-se que o posicionamento da fonte de sinal afetaria a capacidade da rede de distinguir entre fontes de emissão próximas. As variáveis dependentes incluíam a ativação dos LEDs indicadores nos medidores, enquanto as variáveis independentes incluíam o posicionamento da fonte de sinal em relação aos medidores.

5.3.1.1 Teste A.1

Com os transdutores dispostos trinta centímetros afastados, aproximou-se o papel do equipamento a esquerda da Figura 42(a). O teste teve por finalidade verificar a viabilidade da rede de detectar qual dos nós está mais próximo da fonte.

5.3.1.2 Teste B.1

Com os transdutores dispostos trinta centímetros afastados, aproximou-se o papel do equipamento a direita da Figura 42(b). O teste apresentou o mesmo objetivo do teste anterior.

5.3.1.3 Teste C.1

Realizou-se o terceiro teste objetivando verificar o comportamento da rede em uma situação de desconhecimento de qual artefato está mais próximo da fonte. Com os transdutores dispostos trinta centímetros afastados, posicionou-se o papel no meio; entre os dois transdutores; vide a Figura 42(c).

5.3.1.4 Teste D.1

Com os transdutores dispostos trinta centímetros afastados, posicionou-se o papel fora do espaço entre os medidores. A fonte foi instalada a trinta centímetros do transdutor da esquerda; vide Figura 42(d).

5.3.1.5 Teste E.1

Com os transdutores dispostos trinta centímetros afastados, posicionou-se o papel fora do espaço entre os medidores. A fonte foi instalada a trinta centímetros do transdutor da direita; vide Figura 42(e).

5.3.1.6 Teste F.1

Com a fonte próxima do sensor presente a direita da Figura 42(f), aproximou-se os dois equipamentos o máximo possível a fim de verificar a menor distância em que ainda há a detecção de qual dos artefatos está mais próximo da fonte.

5.3.2 Limites de Detecção do SGP30

Houve a necessidade de verificar a capacidade do sensor SGP30 de capturar diferenças significativas na densidade de partículas de COVs presentes no ambiente, realizamos alguns testes funcionais. Essa necessidade surge da importância de compreender o desempenho do sensor em condições práticas. Esta compreensão é crucial para garantir sua eficácia em aplicações de monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos. Supôs-se que o sensor seria sensível o suficiente para capturar variações na densidade de COVs e as variáveis dependentes incluíam os níveis de voláteis medidos pelo sensor, enquanto as variáveis independentes eram a presença de respiração humana e a presença de um perfume. Os experimentos supracitados foram realizados dentro das condições operacionais recomendadas pela Sensirion (2021), que sugerem o melhor desempenho do sensor quando operado em uma faixa de temperatura entre 5°C a 55°C e uma umidade de 4 g/m³ a 20 g/m³.

5.3.2.1 Teste A.2

No primeiro teste, monitoramos a respiração humana. Durante um período de cinco minutos, o pesquisador fez respirações próximas ao sensor. O teste visou averiguar se o sensor estudado tem a capacidade de estimar o ritmo de inspiração e expiração humana e testar o algoritmo de transmissão de dados via método HTTP. Um *script* em Python foi usado para visualizar os dados amostrados e enviados a planilha Google Sheets.

5.3.2.2 Teste B.2

Outro importante ponto a ser verificado corresponde ao objetivo de alcançar a concentração máxima de COVs detectável pelo sensor. Uma folha de papel perfumada foi agitada sobre o SGP30 por um período de dois minutos.

5.4 DETECÇÃO DE UMA PERIODICIDADE DIA-NOITE DE EMISSÃO DE TVOCS

O objetivo incluiu a avaliação da eficiência do Transdutor Inteligente Versão II na detecção da presença e nos padrões temporais de COVs provenientes de amostras de arruda (*Ruta graveolens*). A arruda é caracterizada por folhagem densa, odor característico, folhas alternadas e pequenas flores. Dois exemplares da planta foram plantados em um vaso, enquanto o sensor foi instalado acima das plantas, montado em um suporte de madeira.

O experimento foi conduzido em uma área aberta, permitindo o contato da planta com o ambiente externo, conforme ilustrado na Figura 43. A figura destaca o sensor posicionado acima da arruda por meio de um suporte de madeira. Os dados médios do sensor foram registrados ao longo de dois períodos de monitoramento, cada um com duração de dois dias. As amostras incluíram a emissão de COVs e outros dados ambientais, repetidos após uma pausa de alguns dias. A suposição central do experimento é que tanto a arruda apresenta um ciclo de emissão de COVs quanto o dispositivo desenvolvido é capaz de detectar esse processo. Os COVs, juntamente com outros dados ambientais, foram amostrados durante um período de dois dias e duas noites, com repetição após uma pausa de alguns dias. Para reduzir o impacto do ruído, foi calculada a média dos dados do sensor durante os períodos de 5h às 17h (dia) e de 17h às 5h (noite). Todos os valores médios, incluindo COV, umidade, temperatura, pressão e iluminação, foram normalizados em relação aos valores obtidos no segundo dia.



Figura 43 – Ciclo Diurno Noturno. Fonte: Própria.

5.5 EXPERIMENTOS NA ESTUFA

Para este experimento, foi construída uma estufa, casa de vegetação inteligente, no laboratório do Centro de Informática (CIN-UFPE), Figura 44. Ainda considerando a importância da engenharia reversa na validação das capacidades e limitações dos sensores, realizou-se experimentos onde sujeitou-se a estufa a:

- Primeira série temporal (TS1): Leitura de dados na presença de planta tipo Arruda e com iluminação das 05h00 às 17h00 ao longo de uma semana;
- Segunda série temporal (TS2): Leitura de dados na presença de uma planta do tipo Arruda e sem iluminação ao longo de uma semana;
- Terceira série temporal (TS3): Leitura de dados na ausência da planta e com iluminação das 05h00 às 17h00 ao longo de uma semana;
- Quarta série temporal (TS4): Leitura de dados na ausência da planta e de luz, ao longo de uma semana;

Note que a Figura 44 ilustra em (a) vista externa da estufa, (b) foto da estrutura de medição. Durante o experimento, diversos parâmetros ambientais foram monitorados pelo conjunto de sensores, cada um desempenhando uma função específica. O sensor SHT31 foi utilizado para medir a temperatura ambiente, enquanto o TSL2561 avaliou o índice de luminosidade (lux) presente no ambiente. Além disso, o sensor BME680 registrou a pressão atmosférica, temperatura, valor de resistência em ohms e umidade do ar. Por fim, o SGP31 coletou dados de resistência, concentração de tVOC (Compostos Orgânicos Voláteis Totais), índice de H₂, Etanol e CO₂.

5.5.1 Avaliação das Séries Temporais

O teste visou plotar em gráficos contínuos os dados de Temperatura, Pressão, Umidade, H₂, CO₂, tCOVs e Etanol. Dados são oriundos do SHT31, SGP30, BME60 e TSL2561.

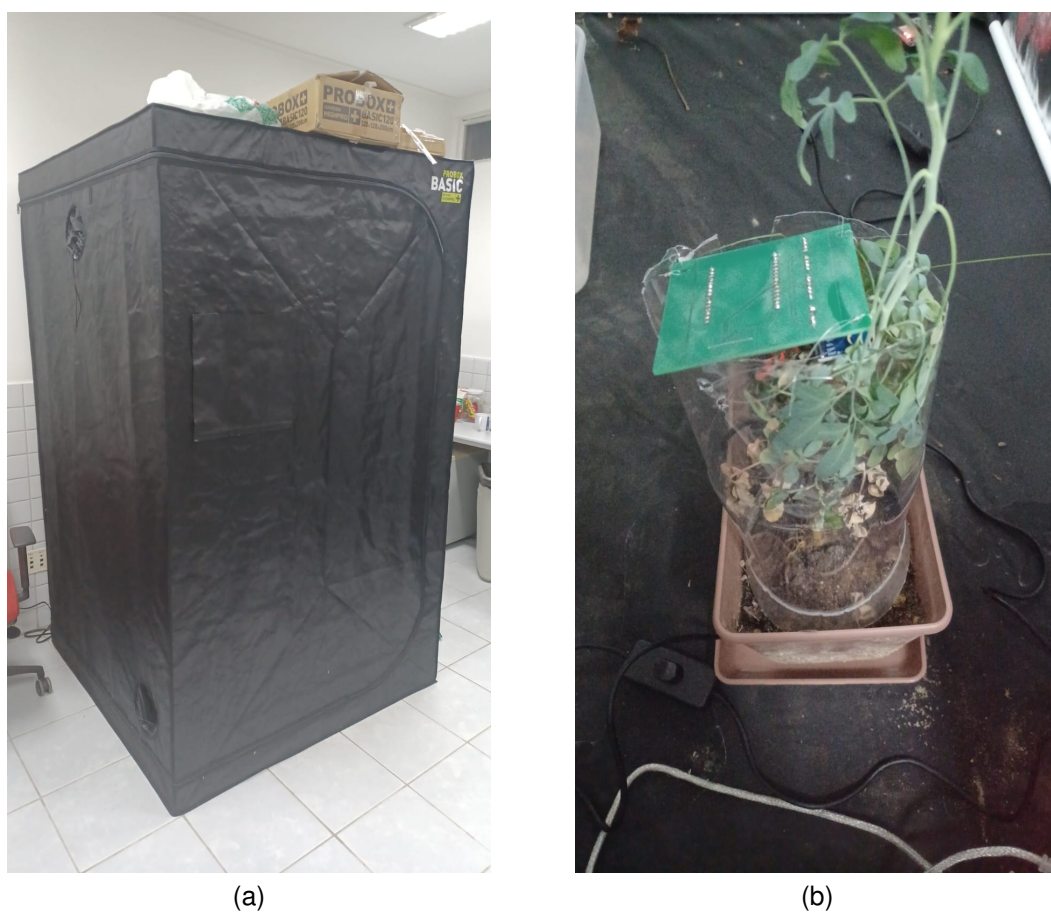


Figura 44 – Estufa. Fonte: Própria

5.5.2 Avaliação da Correlação Entre os Parâmetros

Na Seção 5.4, apresentamos quatro séries temporais medidas usando um único *Smart Transducer* (versão dois). Nesta seção, é apresentada uma análise mais detalhada destes dados, com o objetivo de obter informações adicionais sobre a influência da presença de plantas nas respostas da qualidade do ar. Nossa investigação se desenvolve em múltiplas frentes, começando com a exploração da correlação entre vários parâmetros medidos. Posteriormente, empregamos a análise de Fourier para revelar as intrincadas assinaturas de tempo incorporadas nos dados tVOC. Além disso, apresentamos uma sofisticada malha de sensores projetada para monitorar simultaneamente o ambiente próximo à planta e a uma distância definida. A malha do sensor amostrou dados ao longo de um mês.

5.5.3 Avaliação da Frequência do Ciclo Circadiano de Arruda

Desenvolveu-se a análise da Transformada Rápida de Fourier (FFT) dos dados coletados nos cenários onde a Arruda recebeu acesso a água e luz (TS1); onde a planta foi retirada da estufa (TS3) e onde a planta ficou desprovida de água e luz (TS2). O experimento conduzido dentro da estufa ao longo de uma semana para cada cenário. A análise utilizou a função escrita em python presente no Anexo C para gerar os gráficos da figura 60.

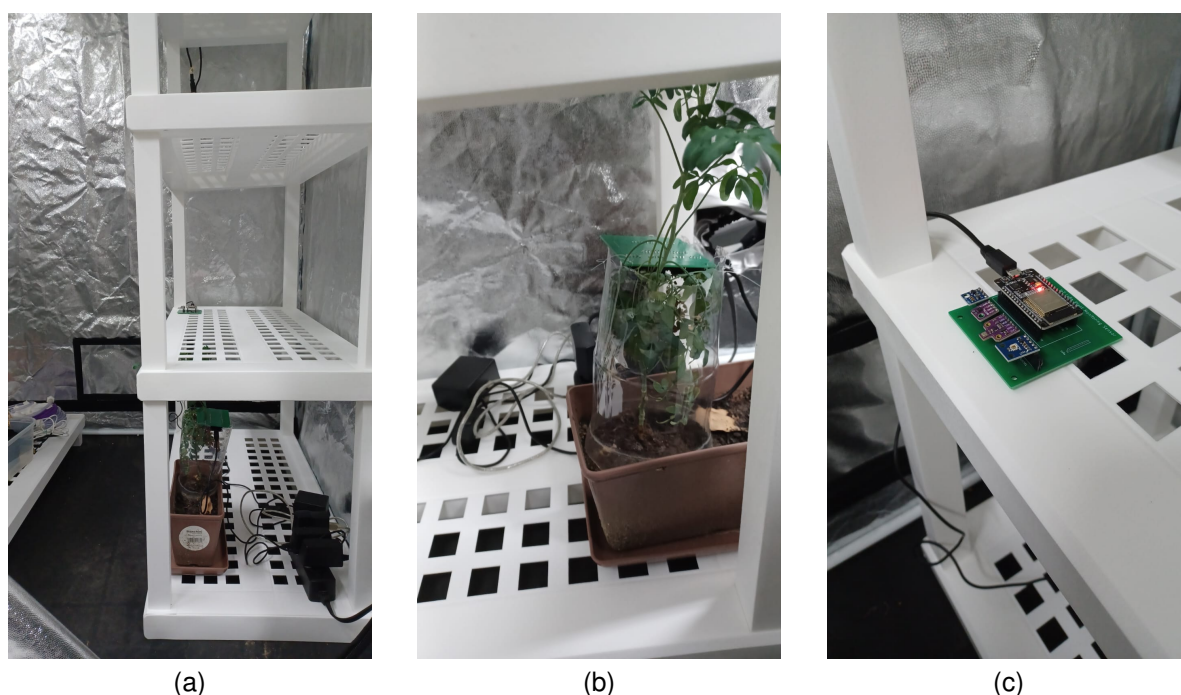


Figura 45 – Rede Mesh. Fonte: Própria.

5.6 AVALIAÇÃO DA REDE *MESH* DE SENSORES

Uma rede *mesh* de sensores IoT foi estabelecida em uma estufa, onde dois sensores foram posicionados em diferentes proximidades de uma planta de Arruda ao longo de quarenta e três dias. Esse experimento não apenas revelou a capacidade dos sensores em detectar a presença da planta, mas também evidenciou claramente a influência significativa da planta nos dados coletados pelos sensores. A Figura 45 apresenta a estrutura da coleta de dados na estufa usando a rede *mesh*.

A configuração da rede *mesh* envolveu dois sensores e um gateway, todos empre-

gando o processador ESP32. O nó raiz da rede foi responsável pela coleta e encaminhamento dos dados para planilhas separadas no Google Sheets, permitindo análises detalhadas posteriormente que culminou nas matrizes de correlação.

5.7 RESUMO DO CAPÍTULO

O presente capítulo objetivou esclarecer ao leitor o processo de desenvolvimento dos *firmwares* elaborados para operar os sensores utilizados no projeto de pesquisa; bem como descrever o processo de *setup* dos experimentos previamente descritos. O capítulo realiza uma apresentação minuciosa dos aspectos de *firmware* utilizados para elaborar os sensores; bem como suas instalações em cada cenário observado. De modo que foi possível observar os aspectos de dois transdutores inteligentes distintos; cada um com características e funções específicas para a pesquisa.

O experimento envolvendo o posicionamento da fonte de sinal de calor utilizando o CCS811 envolveu a expectativa em comprovar os limites de detecção do componente; buscando entender se o transdutor inteligente versão I é capaz de detectar a fonte de calor. Já nos experimentos envolvendo séries temporais, buscou-se verificar diferenças significativas nos sinais dos parâmetros avaliados quando o cenário de experimentação é alterado. O experimento do ciclo circadiano teve por expectativa a busca por detectar o parâmetro rítmico de emissão de COVs por parte da amostra de vegetal do tipo Arruda. Por fim, os experimentos envolvendo a rede mesh de sensores buscou detectar a eficácia em que uma rede de sensores descentralizada apresenta para o cenário de aplicação proposto ao longo da pesquisa.

O Transdutor Inteligente Versão I foi elaborado com o intuito de verificar a capacidade de reação do CCS811 a cenários de umidade elevada; bem como construir o esqueleto de uma rede mesh de sensores; por meio do *Firmware* Versão I. O Transdutor Inteligente Versão II, mais completo que a versão anterior, teve por objetivo avaliar a capacidade de sensores de qualidade do ar de baixo custo distintos (SGP30 e BME680) em detectar a presença de uma planta do tipo arruda por meio do sinal de COV por ela emitido. Desse modo, o *Firmware* Versão II foi utilizado neste sensor para elaborar séries históricas de dados dos sensores quando submetidos nos cenários de observação supracitados. Além disso, também foi possível utilizar algoritmo de FFT para traçar o perfil rítmico de COVs utilizando processamento em alto nível (Python).

6 RESULTADOS

A seção destina-se a apresentar a descrição dos experimentos realizados ao longo da pesquisa e seus resultados. O objetivo é descrever os processos que regiram os testes e experimentos deste trabalho.

6.1 IMPACTO DO POSICIONAMENTO DA FONTE DE SINAL UTILIZANDO O CCS811

O experimento teve como objetivo avaliar a sensibilidade dos sensores utilizados na elaboração dos dispositivos.

Os experimentos intitulados “Teste A” e “Teste B” ilustraram que em uma distância de trinta centímetros, a sensibilidade do CCS 811 é acentuada. Isso permite o uso do sensor em uma rede de dispositivos voltados a aplicações de medição de qualidade do ar que são propostas por este documento. Entretanto, o fato dos LEDs de indicação visual de temperatura e humidade não responderem denota que tais parâmetros não são alterados de forma acentuada em tal configuração e posicionamento dos nós transdutores.

O “Teste C”, diferentemente dos testes supracitados, mostrou que há uma região entre os dois transdutores em que a rede não consegue distinguir qual nó está mais próximo da fonte. Isso denota limite de resolução do algoritmo proposto e da medição do CCS811.

Já nos “Testes D e E”, os transdutores se comportaram de maneira semelhante ao Teste C; onde às vezes o transdutor da esquerda se apresentava como o mais próximo da fonte que estava localizada mais próxima do transdutor da direita e vice-versa. Esse dado obtido denota que há uma distância limite que quando cruzada, o fator direção do ar em movimento que é capaz de carregar as partículas de CO₂ e VOC influencia na detecção de mais e de menos particulado por parte do CCS811. A Figura 42(e) torna evidente o relatado acima uma vez que os LEDs dos dois sensores estão acesos ao mesmo tempo.

O “Teste F”, por sua vez, mostrou que os Transdutores são capazes de distinguir qual está mais próximo da fonte a partir de cinco centímetros de distância. Caso os mesmos estiverem mais próximos, os respectivos sensores CCS811 dos transduto-

res irão detectar valores iguais ou parecidos de quantidade de particulado dos gases avaliados.

Os resultados confirmaram parcialmente as pontuações relatadas na descrição do experimento. Os Testes A, B e C mostraram que a rede conseguiu distinguir entre fontes de emissão próximas em certas configurações, mas encontrou limitações em detectar a proximidade da fonte quando esta estava entre os transdutores. Os Testes D e E revelaram que a direção do movimento do ar influenciou na detecção de partículas, resultando em dificuldades para distinguir entre os transdutores. O Teste F demonstrou que a partir de uma distância de cinco centímetros, os transdutores foram capazes de distinguir a proximidade da fonte.

6.2 LIMITES DE DETECÇÃO DO SGP30

Note que a Figura 46 representa os dados de COV mostrados quando o nó de multi-sensores é exposto a respiração humana e 47 perfume. Note a escala diferente em ambas as imagens. Os resultados apresentados confirmaram que o sensor mantém seu desempenho esperado quando operado dentro desses parâmetros. Os dados experimentais corroboraram a especificação da Sensirion (2021) sobre a faixa de saída para os sinais de COV e CO₂eq. Além disso, os testes reforçaram a importância das condições operacionais recomendadas, especialmente no que se refere à exposição prolongada a concentrações extremas de compostos orgânicos, destacando a necessidade de seguir as instruções detalhadas no documento de manuseio e montagem do SGP30 para garantir uma operação estável do sensor.

A realização destes testes práticos não apenas validou as especificações técnicas fornecidas pela Sensirion (2021), mas também evidenciou a relevância de realizar testes de campo para garantir a conformidade das especificações com as situações do mundo real. O processo de engenharia reversa é crucial, especialmente para sensores de baixo custo ou com documentação limitada, onde a observação direta do desempenho prático é fundamental para validar as capacidades do componente. A confirmação prática desses dados é essencial para a compreensão dos limites e o comportamento desses sensores em aplicações específicas, garantindo sua confiabilidade e precisão em cenários do mundo real. Os resultados dos testes confirmaram que o sensor SGP30 é capaz de detectar variações na densidade de COVs no ambi-

ente, conforme especificado pelo fabricante. Além disso, os resultados destacaram a importância de realizar testes de campo para validar as especificações técnicas dos sensores em condições do mundo real. Essa validação é essencial para garantir a confiabilidade e precisão dos sensores em aplicações práticas de monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos.

6.2.1 Teste A.2

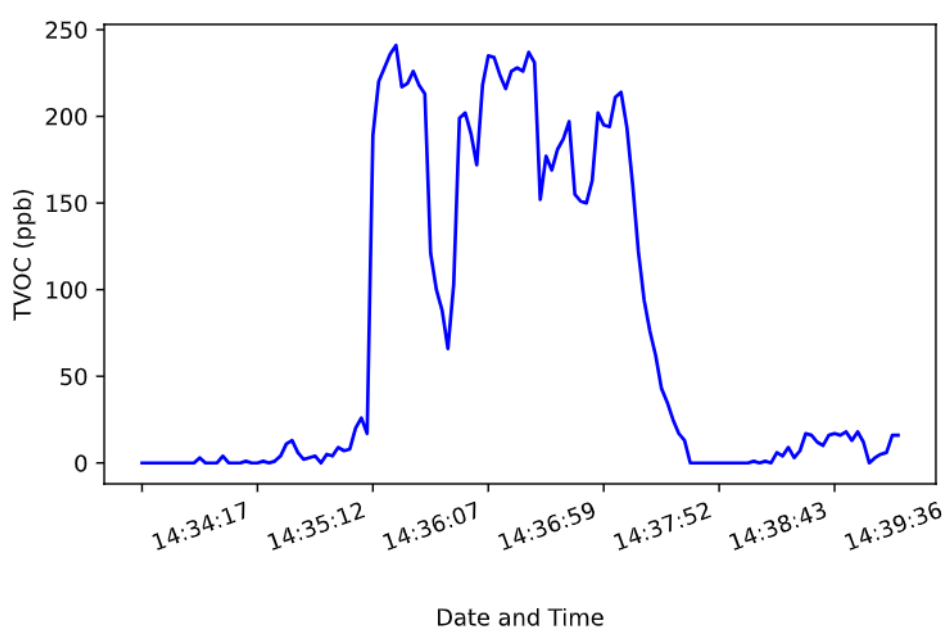


Figura 46 – Dados de tVOC amostrados quando o nó é exposto a respiração humana. Fonte: Própria.

No primeiro teste, monitoramos a respiração humana. Durante um período de cinco minutos, uma pessoa fez respirações próximas ao sensor. Os resultados são mostrados na Figura 46. Assim que o indivíduo começou a respirar perto do sensor, o nível de COV subiu de quase zero para 250 ppb. O ritmo de inspiração e expiração pôde ser facilmente observado e monitorado. Quando o pesquisador se afastou do sensor, os níveis de COV caíram novamente para quase zero. Como esperado para um sensor de COV em ambientes internos, o SGP30 é sensível o suficiente para perceber aspectos da respiração humana. O experimento também confirmou que os dados do sensor podem ser transmitidos com sucesso para o banco de dados em tempo real, como o Google Sheets, por exemplo. Um *script* em Python foi usado para visualizar os dados amostrados. Os dados experimentais obtidos revelaram que o SGP30 foi capaz

de capturar a respiração humana, atingindo um nível de 250 ppb de tVOC, a Sensirion (2021) indica uma faixa de medição para o sinal de COV de 0 ppb a 60 000 ppb, cobrindo concentrações esperadas em aplicações de qualidade do ar em ambientes internos.

6.2.2 Teste B.2

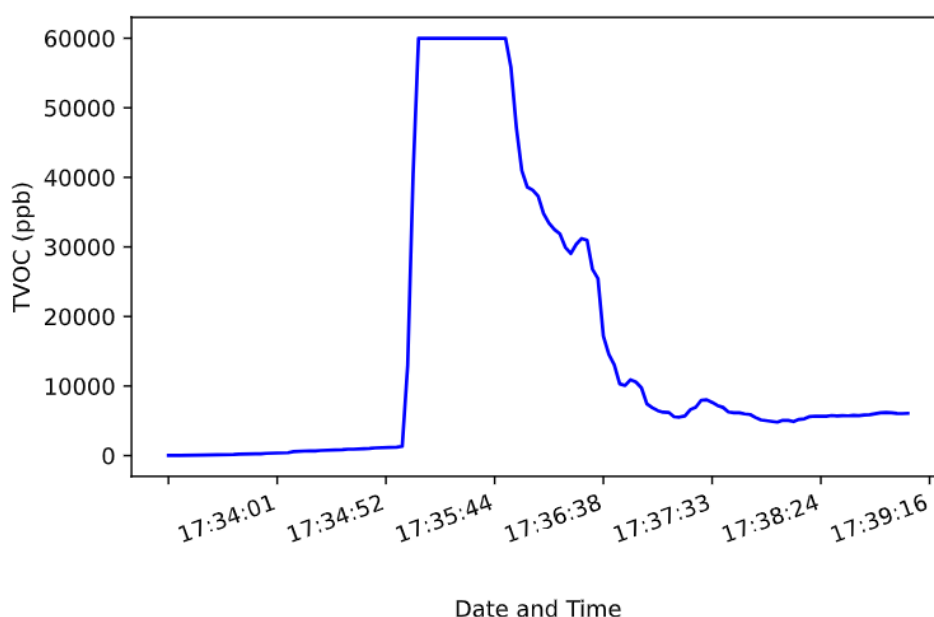


Figura 47 – Dados de tVOC amostrados quando o nó é exposto a folha perfumada. Fonte: Própria.

Os dados adquiridos desse experimento são mostrados na Figura 47, detalhando o período em que a folha de papel foi usada. De fato, a presença de perfume no ambiente é suficiente para saturar o SGP30 em seu limite teórico de 60 000 ppb. É possível comprovar que os testes realizados se alinham com as especificações do informadas pela Sensirion (2021) para os sinais de COV e CO2 equivalente (CO2eq), apresentando o fato de que o SGP30 é capaz de alcançar concentração máxima de 60 000 ppb durante a presença de perfume no ambiente. Isso tem relacionamento com a faixa de medição especificada para o sinal de COV, mostrando a sensibilidade do sensor à presença de substâncias voláteis no ar.

6.3 DETECÇÃO DE UMA PERIODICIDADE DIA-NOITE DE EMISSÃO DE TVOCS

Conforme informado anteriormente, dois exemplares da arruda foram plantados em um jarro e o sensor foi montado em um suporte de madeira capaz de segurar todo o circuito na parte superior das plantas. A Figura 48 apresenta os valores médios normalizados para o valor do segundo dia, por exemplo, COVs=995 ppb, RH=62 %, $T=32^{\circ}\text{C}$, $p=101.4\text{ Pa}$, $E_V=3001\text{ lx}$ na Figura 49. Em ambos os períodos, a concentração de COV seguiu um ciclo dia-noite, destacado por uma linha em negrito para o segundo período da Figura 49. No primeiro período de monitoramento (Figura 48), também foi observado um aumento geral dos níveis de tVOC. Na ausência da arruda, o nível ambiental de COVs chega a ca. 180 ppb (ca. 0.18 depois da normalização). A emissão de COVs juntamente com outros dados ambientais foram amostrados ao longo de um período de dois dias e duas noites e repetidos após uma pausa de alguns dias.

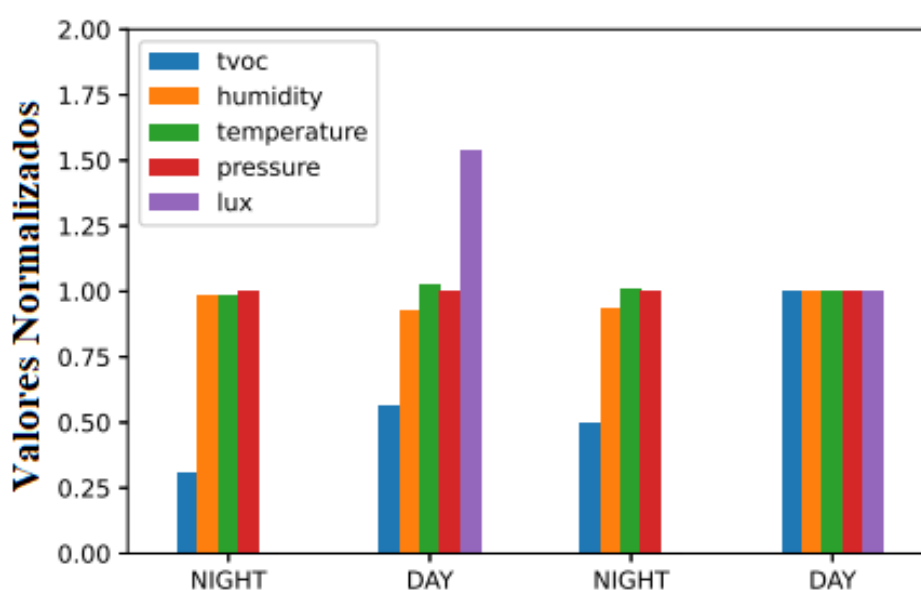


Figura 48 – Ciclo Circadiano: Dados normalizados. Fonte: Própria.

A iluminação (última barra à direita na Figura 48) oscilou entre dia e noite. Durante o período da noite, a iluminação normalizada caiu para um valor muito baixo em comparação com o dado nos períodos diurnos e a barra correspondente no gráfico não é visível durante os períodos noturnos. Outro ponto importante observado foi o fato de que outros fatores ambientais que poderiam influenciar a emissão de COV da planta, como umidade, temperatura e pressão, permaneceram bastante constantes durante o ciclo dia-noite. Os dados ambientais são típicos de um clima tropical que apresenta

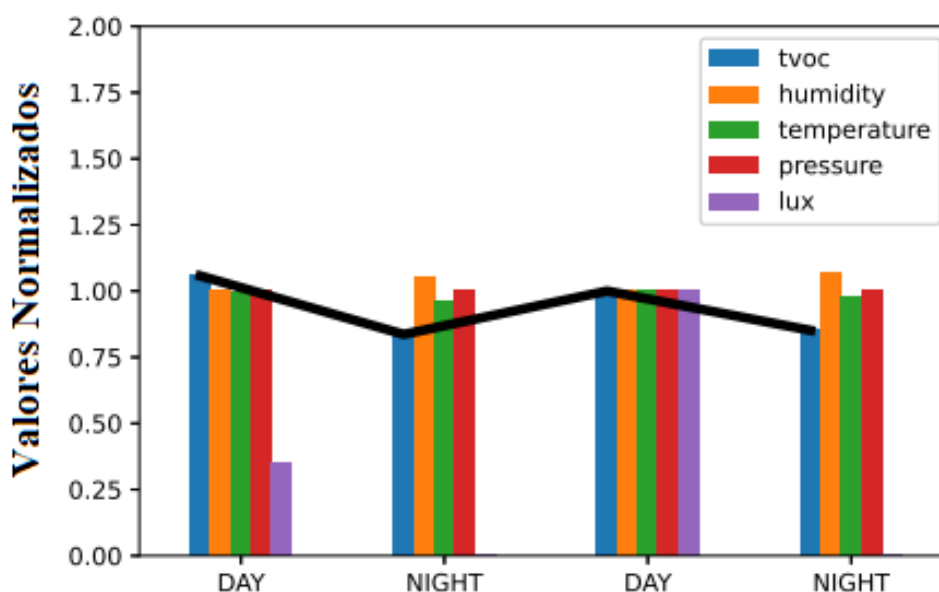


Figura 49 – Ciclo Circadiano: Detalhe rítmico. Fonte: Própria.

amanheceres repentinos e baixa variação de temperatura.

No entanto, em ambas as repetições do experimento, foi encontrado um padrão cíclico claramente perceptível da emissão de tVOC. Durante o dia, a arruda emite em média uma quantidade maior de COV quando comparado aos dados coletados durante a noite. O ciclo dia-noite foi destacado pela linha em negrito na Figura 49. Como a maioria dos dados ambientais se apresentou estável, concluímos que este padrão periódico reflete mudanças metabólicas da arruda desencadeadas por variações na quantidade de luz presente no ambiente. Observou-se ainda um aumento geral nos níveis de COV durante o período de monitoramento no primeiro experimento, conforme ilustrado na Figura 48. É válido destacar que tais resultados foram compartilhados no artigo de Cardoso e Blawid (2022)

6.4 EXPERIMENTOS NA ESTUFA

Os resultados abaixo descritos, conforme supracitado, dizem respeito aos experimentos realizados na estufa construída nas instalações do Centro de Informática da UFPE.

6.4.1 Avaliação das Séries Temporais

Os resultados abaixo dizem respeito a observação das séries temporais de dados coletados com base nos sensores SHT31, SGP30, BME680 e TSL2561.

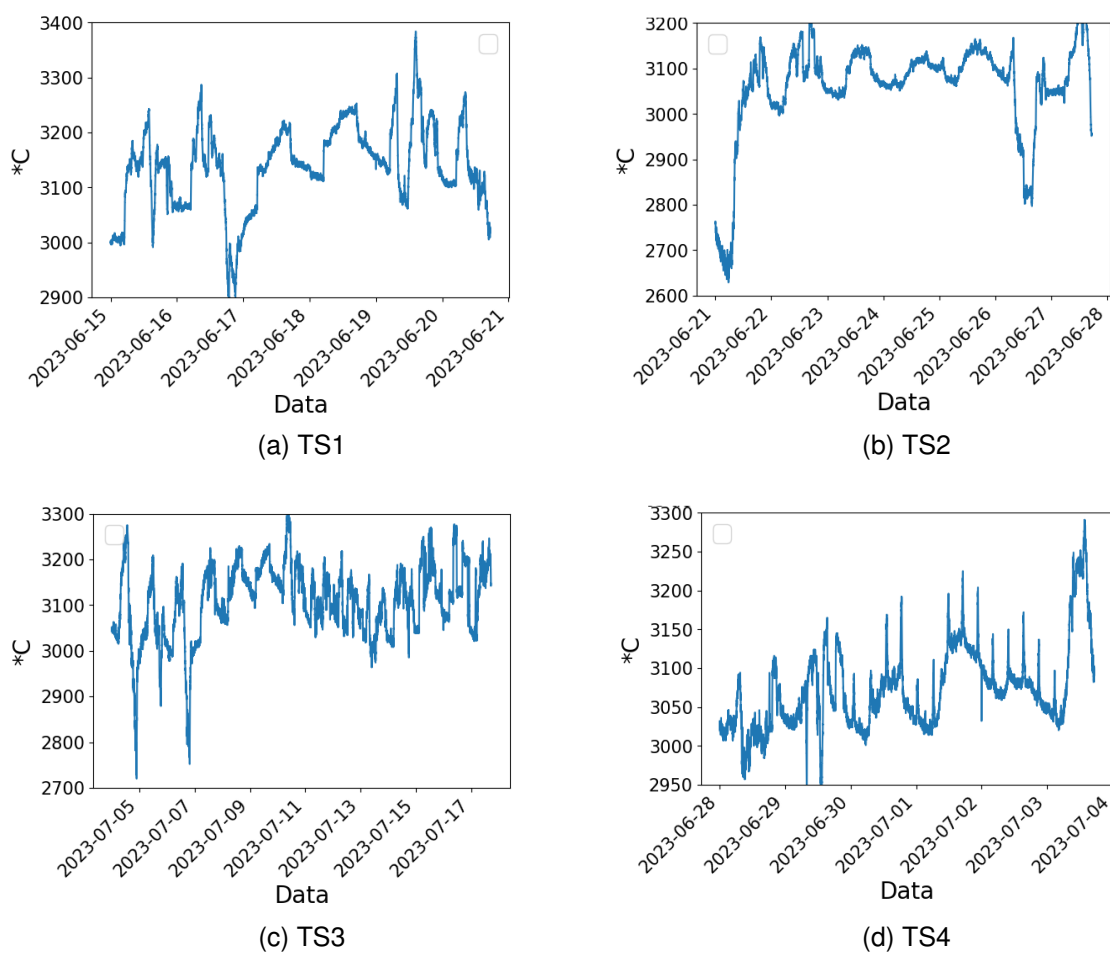
6.4.1.1 Considerações sobre as Medições do SHT31

Os gráficos da Figura 50 representam a leitura de temperatura obtida a partir do SHT31 nas condições anteriormente mencionadas. A tabela 7 apresenta os valores máximos e mínimos de temperatura obtidos ao longo do experimento. Note que a Figura 50 representa as séries temporais de temperatura para quatro cenários diferentes: TS1 - Cenário com presença da planta e com iluminação periódica (a); TS2 - Cenário com presença da planta sem iluminação (b); TS3 - Cenário sem planta e com iluminação periódica (c); TS4 - Cenário sem planta e iluminação (d).

A temperatura desempenha um papel crucial como fator ambiental, exercendo influência tanto na atividade metabólica das plantas quanto na resistência dos sensores de gás. Este último, se não for devidamente considerado, pode levar a interpretações equivocadas de alterações na detecção de compostos orgânicos voláteis (tVOC). Portanto, é imperativo incluir dados de séries temporais de temperatura juntamente com as medições de COV. As séries temporais registradas ilustram inequivocamente que as variações de temperatura nos cenários testados estão longe de serem negligenciáveis. O sensor utilizado neste estudo demonstra capacidades louváveis ao monitorar efetivamente essas flutuações de temperatura. Essa integração de dados de temperatura aprimora a precisão e a exatidão da interpretação das medições de COV, garantindo uma compreensão mais abrangente da dinâmica ambiental em consideração.

Ao analisar as especificações apresentadas pelo Sensirion (2021) acerca do sensor SHT31, é possível observar que a precisão típica do sensor para a faixa de temperatura de -40°C a 90°C é de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$. A faixa especificada de operação varia de -40°C a 125°C , com uma resolução típica de 0.015°C . Além disso, o Sensirion (2021) indicou que o sensor exibe seu melhor desempenho dentro da faixa de temperatura normal recomendada de 5°C a 60°C e umidade de 20% RH a 80% RH. A exposição prolongada a condições fora dessa faixa pode temporariamente descalibrar o sensor, especialmente em alta umidade, o que pode ser revertido ao retornar às condições

Figura 50 – Série temporal de temperatura



Fonte: Própria

Cenários	Valor máximo	Valor mínimo	Valor médio
TS1	33.8 °C	29.0 °C	31.8 °C
TS2	32.4 °C	26.3 °C	30.6 °C
TS3	33.2 °C	27.2 °C	31.1 °C
TS4	32.9 °C	29.2 °C	30.3 °C

Tabela 7 – Valores obtidos de temperatura do SHT31. Fonte: Própria

normais. Destaca-se também que a exposição prolongada a condições extremas pode acelerar o envelhecimento do sensor, reforçando a necessidade de um monitoramento rigoroso do ambiente operacional para garantir a precisão do dispositivo ao longo do tempo.

Esses resultados reforçam a importância da aplicação da engenharia reversa para compreender e validar os limites de operação dos sensores, especialmente em situações onde a documentação é limitada. A confirmação prática desses dados permite uma melhor compreensão das capacidades do sensor, levando em consideração seu desempenho em condições do mundo real, alinhando-se às especificações fornecidas e garantindo a precisão e confiabilidade do dispositivo em diversas aplicações.

6.4.1.2 Considerações sobre as Medições do TSL2561

A Figura 51 representa as séries temporais de iluminação para quatro cenários diferentes: TS1 - Cenário com presença da planta e com iluminação periódica (a); TS2 - Cenário com presença da planta sem iluminação (b); TS3 - Cenário sem planta e com iluminação periódica (c); TS4 - Cenário sem planta e iluminação (d).

Os gráficos da Figura 51 representam a leitura de lux obtida a partir do TSL3561 nas condições anteriormente mencionadas. A tabela 8 apresenta os valores máximos, mínimos e médios de índice de luminosidade obtidos ao longo do experimento.

A fotossíntese e a respiração representam os processos metabólicos fundamentais das plantas. Durante o dia, as folhas experimentam uma troca dinâmica de oxigênio e dióxido de carbono. Na presença de luz, ocorre a fotossíntese, levando à liberação de oxigênio e à absorção de dióxido de carbono. No entanto, esses processos cessam durante a noite e as plantas passam a consumir oxigênio. Dado que os sensores de qualidade do ar detectam principalmente os níveis de dióxido de carbono, torna-se crucial estabelecer uma correlação com a intensidade da exposição à luz. Para conseguir isso, é essencial integrar dados de séries temporais de iluminação juntamente com medições de sensores de gás que monitoram o ambiente da planta. Este conjunto de dados combinado fornece *insights* sobre a intrincada interação entre as condições de luz e as trocas gasosas dentro da planta. Essas medições abrangentes não só ajudam na compreensão das respostas metabólicas da planta, mas também contribuem para caracterizar o sistema de iluminação artificial numa tenda de cultivo inteligente.

As oscilações periódicas observadas na iluminação artificial, conforme ilustrado na Figura 51, ressaltam a necessidade de uma análise matizada. Esta abordagem holística garante uma compreensão mais precisa dos fatores ambientais que influenciam as atividades metabólicas das plantas.

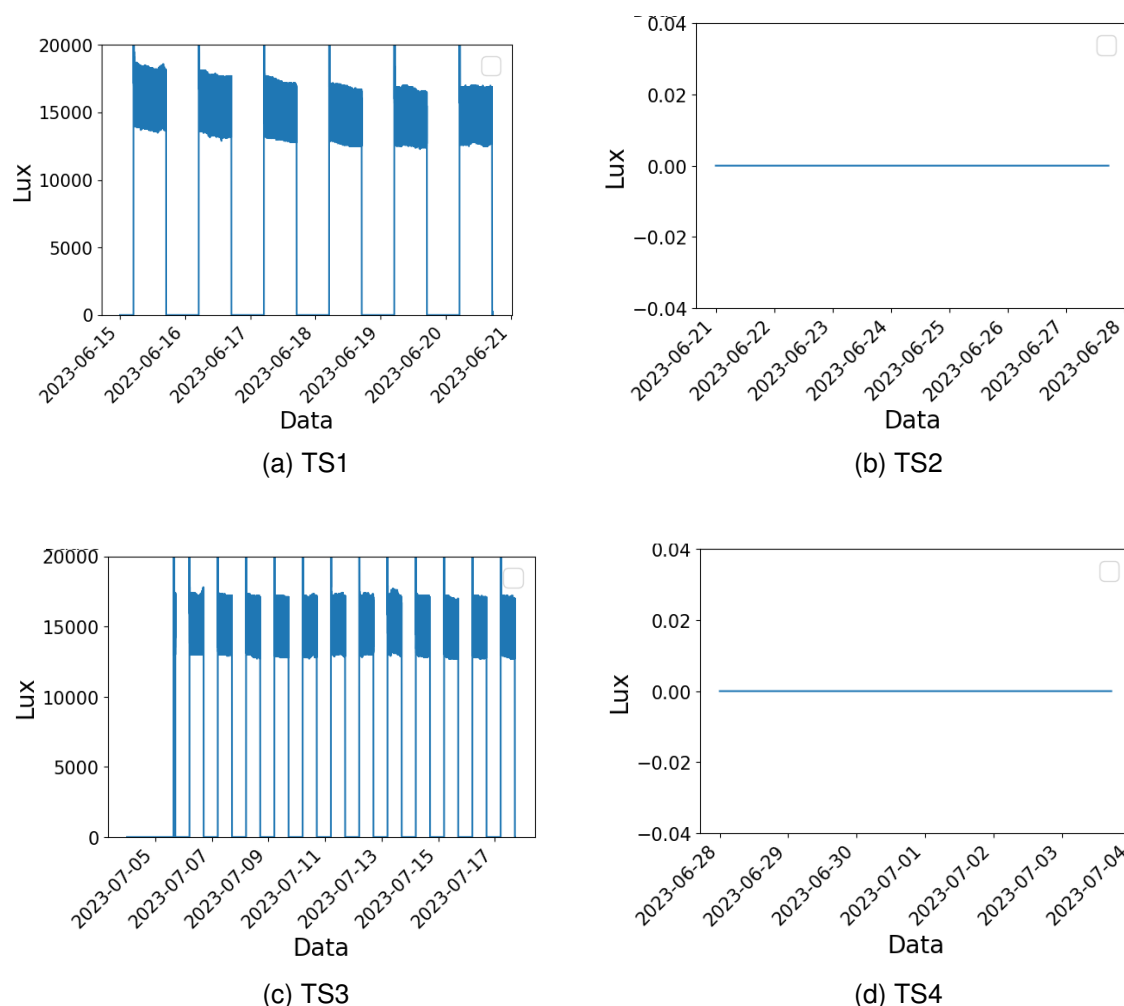


Figura 51 – Séries temporais de iluminação. Fonte: Própria

Analisando o que disse AMS (2013), o sensor TSL2561 é um conversor de luz para sinal digital que utiliza uma interface direta I2C. O sensor combina um fotodiodo de largura de banda considerável (visível e infravermelho) com um fotodiodo sensível apenas ao infravermelho em um único circuito integrado CMOS. Os dados digitais gerados foram utilizados para derivar a iluminância em lux, aproximando a resposta do sensor à resposta do olho humano. O AMS (2013) também destacou a aplicação deste sensor em diversas situações, como controle de retro iluminação de *displays*, gerenciamento de energia e iluminação baseada na condição de luz ambiente. No entanto, a correlação dos dados experimentais com as especificações informadas por AMS

(2013) reforça a necessidade da aplicação da engenharia reversa para compreender e validar os limites de operação dos sensores, principalmente em condições menos documentadas.

É notável que as leituras de lux do TSL2561 variaram consideravelmente entre os cenários experimentais propostos. As especificações relatadas por AMS (2013) descrevem o funcionamento do sensor em condições de luz ambiente e sua capacidade de ajuste da retro iluminação com base na luz ambiente percebida. A correlação direta entre os dados experimentais e as informações apresentadas por AMS (2013) fornece *insights* essenciais para entender o desempenho e os limites do sensor em condições reais, validando a importância da engenharia reversa em cenários onde a documentação é limitada.

6.4.1.3 Considerações sobre as Medições do BME680

Várias grandezas são medidas com o sensor BME680, incluindo temperatura, umidade relativa, pressão e resistência do sensor de gás. Este último representa a medição bruta para avaliar a qualidade do ar. Valores eficazes de, por exemplo, dióxido de carbono, hidrogênio, COV ou etanol são todos derivados da medição de resistência.

Para comparação com as medições de temperatura obtidas do sensor SHT31, a tabela 9 apresenta os valores máximos, mínimos e médios de temperatura obtidos do sensor BME680 ao longo dos experimentos. Consideramos o uso de informações redundantes de sensores como medida de qualidade essencial durante o desenvolvimento de plataformas de sensores de baixo custo.

Os dados obtidos do sensor BME680 e do sensor SHT31 durante o experimento revelam uma notável coerência em suas leituras. As tabelas 9 e 7 exibem respectivamente as leituras de temperatura obtidas pelo BME680 e SHT31 em cenários idênticos. Notavelmente, as leituras máximas, mínimas e médias de temperatura registradas por ambos os sensores demonstram similaridades consistentes em diferentes condições experimentais. Por exemplo, na presença da planta e luz, o BME680 apresentou uma temperatura média de 30.7°C , enquanto o SHT31 registrou uma média de 31.8°C . Da mesma forma, nas mesmas condições com ausência de luz, o BME680 reportou uma média de 29.3°C , e o SHT31 indicou uma média de 30.6°C . Essa consistência nas leituras entre os sensores sugere uma correlação direta em seus desempenhos,

reforçando a confiabilidade e precisão dos dados obtidos sob diferentes cenários experimentais. A coerência dos dados entre o BME680 e o SHT31 é ainda mais evidente quando se compara as variações de temperatura em condições específicas, como na ausência da planta e de luz, onde ambos os sensores registraram temperaturas mais baixas. A consistência entre os valores máximos, mínimos e médios das leituras obtidas por esses sensores em situações similares reforça a confiabilidade dos dados coletados e valida a consistência dos dispositivos em capturar variações ambientais sob diferentes condições experimentais simultaneamente. Essa congruência sugere uma concordância significativa entre os sensores, contribuindo para uma análise mais robusta e confiável das condições ambientais nos experimentos realizados.

De acordo com as especificações do BOSCH (2017) do BME680, trata-se de um sensor 4-em-1 digital, capaz de medir gases, umidade, pressão e temperatura. Este sensor é indicado para dispositivos de baixo consumo energético, podendo ser integrado em dispositivos alimentados por bateria ou em dispositivos acoplados à frequência, como *smartphones* e dispositivos vestíveis. As especificações detalhadas indicam que o sensor possui uma faixa operacional de temperatura de -40°C a 85°C . Além disso, o BOSCH (2017) descreve a operação do sensor em termos de medição de temperatura e os modos de operação disponíveis. Destaca-se a importância da temperatura para a compensação das influências térmicas nos outros parâmetros do sensor, enfatizando que a precisão das medidas depende das configurações de *oversampling* e filtros.

Os gráficos da Figura 52 representam as leituras de umidade obtidas pelo sensor BME680 nas condições apresentadas pelo experimento. A tabela 10 apresenta os valores máximos, mínimos e médios de umidade obtidos ao longo do experimento. Assim como a temperatura, a umidade também influencia a detecção de voláteis. Ambos os valores de temperatura e umidade são, portanto, usados por sensores de gás para compensar medições efetivas de voláteis. Perceba que a Figura 52 representa as séries temporais de umidade relativa para quatro cenários diferentes: TS1 - Cenário com presença da planta e com iluminação periódica (a); TS2 - Cenário com presença da planta sem iluminação (b); TS3 - Cenário sem planta e com iluminação periódica (c); TS4 - Cenário sem planta e iluminação (d).

As afirmações de BOSCH (2017) acerca do sensor BME680, que indicam uma precisão absoluta de $\pm 3\%$ de umidade relativa na faixa de 20% a 80% a 25°C , corro-

boram com os dados obtidos nos experimentos. A precisão demonstrada pelo sensor BME680 é apoiada pelos dados obtidos pela BOSCH (2017), onde a histerese (variação da umidade para uma mesma condição de temperatura) é de $\pm 1.5\%$ r.H. a 25°C e a não-linearidade se mantém em 1.7% r.H. na faixa de 10% a 90% de umidade relativa. Essas características evidenciam a consistência e precisão do sensor ao capturar a umidade em diferentes ambientes, corroborando as leituras observadas nos experimentos e reforçando a confiabilidade dos dados obtidos em condições variadas.

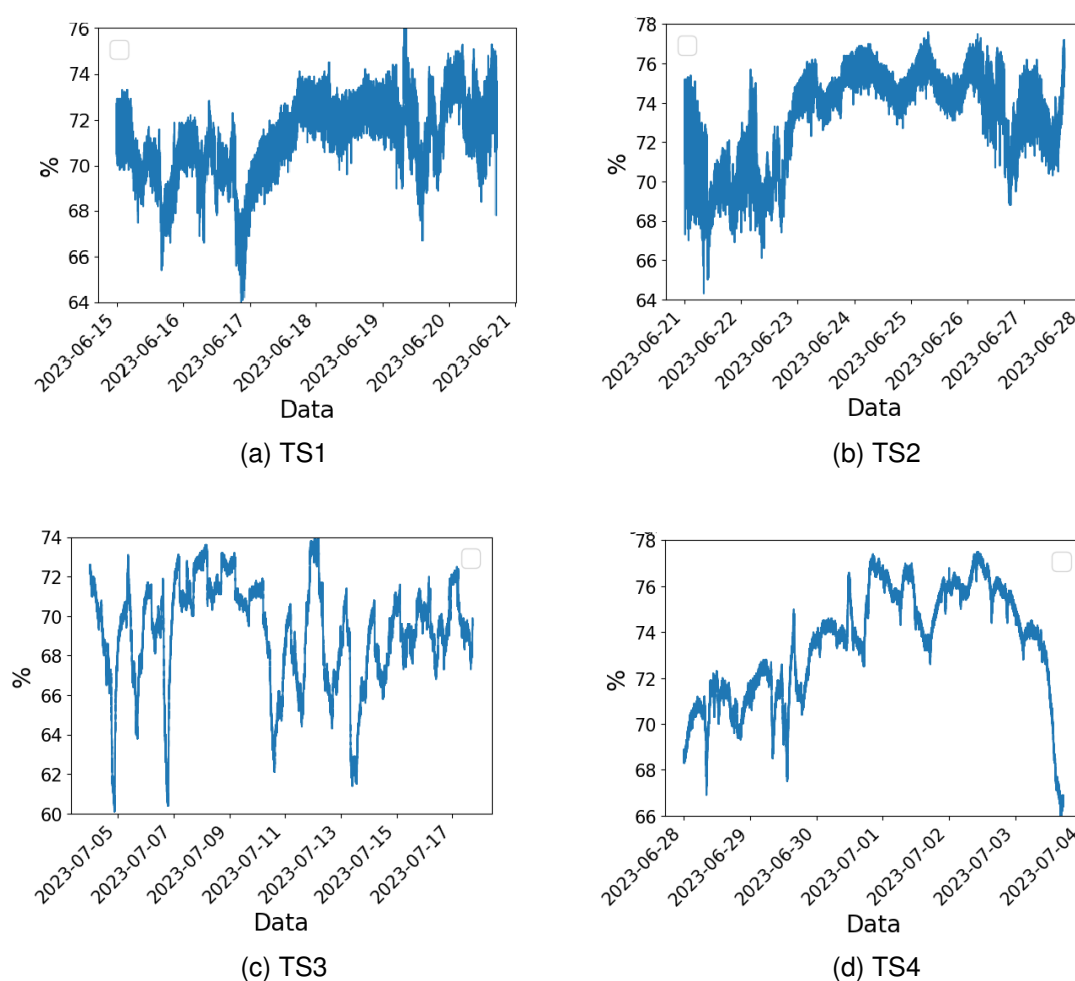


Figura 52 – Séries temporais de umidade relativa. Fonte: Própria

A Figura 53 ilustra os resultados acerca deste teste. Note que as séries temporais de pressão para quatro cenários diferentes: TS1 - Cenário com presença da planta e com iluminação periódica (a); TS2 - Cenário com presença da planta sem iluminação (b); TS3 - Cenário sem planta e com iluminação periódica (c); TS4 - Cenário sem planta e iluminação (d). Além disso, perceba que, a ilustração gráfica (c) difere das demais Figuras uma vez que os pontos do eixo "x" estão espaçados em 2 dias cada. Esse processo foi realizado de modo a permitir mesmo número de pontos nos gráficos.

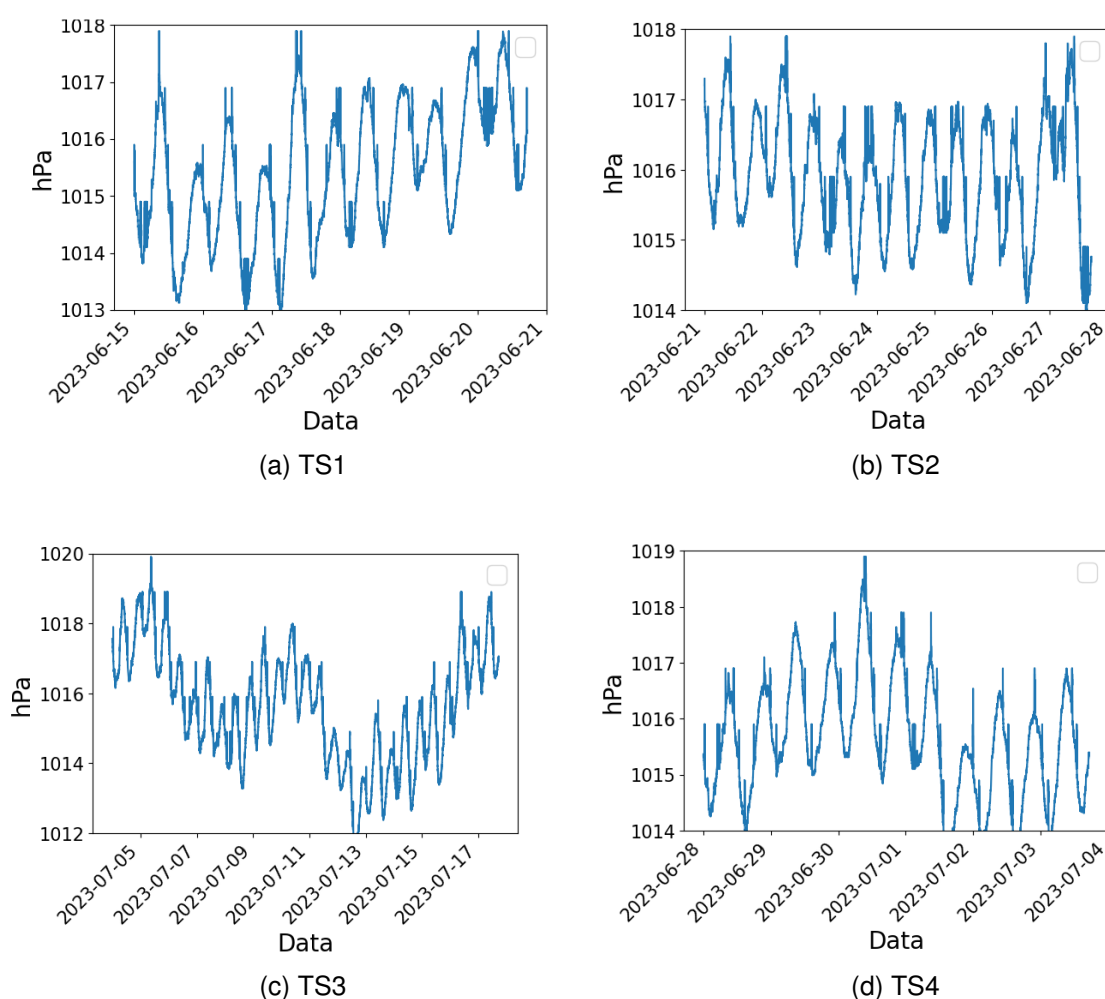


Figura 53 – Séries temporais de pressão. Fonte: Própria.

Ainda sobre o BME680, obteve-se os gráficos da Figura 53 que representam as leituras de pressão obtidas pelo sensor BME680 nas condições apresentadas pelo experimento. A tabela 11 apresenta os valores máximos, mínimos e médios de pressão obtidos ao longo do experimento.

Os dados de pressão obtidos pelo sensor BME680 durante os experimentos revelam um padrão consistente e previsível em diferentes condições ambientais, como apresentado na tabela 11. Como esperado, os diferentes cenários experimentais não influenciam as séries temporais de pressão. Mais interessante que os valores médios de pressão é a observação de uma variação semidiurna da pressão atmosférica (duas vezes ao dia). A atração gravitacional exercida pela Lua e pelo Sol na Terra causa um efeito de inchaço na atmosfera, criando marés atmosféricas. Essas forças de maré levam a variações na pressão do ar. Além disso, é possível observar que a pressão pode ser utilizada como sinal de relógio de 12 em 12 horas, assim como a iluminação pode

ser usada como relógio de 24 horas. Ambos os sinais são periódicos, o que pode gerar uma leve correlação entre os parâmetros. No entanto, não há teor de causalidade direta, ou seja, um sinal não causa o outro.

As especificações do BOSCH (2017), que indicam uma precisão absoluta de ± 0.6 hPa na faixa de pressão de 300 a 1100 hPa e uma resolução máxima de 0.18 Pa, validam os resultados obtidos nos experimentos. O sensor BME680 oferece alta resolução, permitindo a obtenção de dados (Figura 54) precisos de pressão com variações mínimas em diferentes cenários ambientais. Além disso, as características operacionais do sensor, como a possibilidade de *oversampling* para reduzir ruídos e a alta resolução de saída de dados de pressão, evidenciam a consistência e confiabilidade das leituras realizadas em diferentes condições ambientais, reforçando a credibilidade dos dados coletados pelo sensor BME680 durante os experimentos. Obteve-se também os gráficos da Figura 54 que representam as leituras de resistência elétrica obtidas pelo sensor BME680 nas condições apresentadas pelo experimento. Note que a Figura 54 representa as séries temporais de resistência para quatro cenários diferentes: TS1 - Cenário com presença da planta e com iluminação periódica (a); TS2 - Cenário com presença da planta sem iluminação (b); TS3 - Cenário sem planta e com iluminação periódica (c); TS4 - Cenário sem planta e iluminação (d).

A tabela 12 apresenta os valores máximos, mínimos e médios de pressão obtidos ao longo do experimento. O BOSCH (2017) destacou a resistência elétrica como uma das medidas mais puras do sensor BME680, fornecendo informações essenciais sobre a qualidade do ar. Os procedimentos para leitura da resistência elétrica, segundo BOSCH (2017) envolvem etapas específicas de conversão do valor ADC em ohms, levando em consideração fatores como o valor do ADC de gás, o intervalo do ADC de gás, e o erro de troca de faixa.

Durante os primeiros dias do experimento (de 15 a 22 de junho), as leituras de resistência são excepcionalmente altas. Somente depois de uma semana o valor da resistência do BME (resBME) caiu repentinamente. Acreditamos que as primeiras leituras são anômalas. Primeiro, os sinais relatados pelo sensor SGP30 não apresentam comportamento semelhante, embora devam estar relacionados. Além disso, outra série temporal amostrada posteriormente e descrita na Seção 6.5 apresenta valores mais baixos. Assim, as leituras do TS1 e da primeira parte do TS2 não estão incluídas na Tabela 12. Outras evidências de que as medições de resistência do BME680

Cenários	Valor máximo	Valor mínimo	Valor médio
TS1	23 400 lx	0	7946 lx
TS2	0 lx	0 lx	0 lx
TS3	22 000 lx	0 lx	6583 lx
TS4	0 lx	0 lx	0 lx

Tabela 8 – Valores obtidos de iluminância do TSL2561. Fonte: Própria

Cenários	Valor máximo	Valor mínimo	Valor médio
TS1	33.3 °C	27.8 °C	30.7 °C
TS2	30.9 °C	25.3 °C	29.3 °C
TS3	31.0 °C	25.6 °C	29.0 °C
TS4	30.3 °C	27.4 °C	28.6 °C

Tabela 9 – Valores obtidos de Temperatura do BME680. Fonte: Própria

Cenários	Valor máximo	Valor mínimo	Valor médio
TS1	76,2%	64,0%	71,3%
TS2	77,6%	64,3%	73,4%
TS3	74,2%	60,1%	69,4%
TS4	77,5%	65,9%	73,6%

Tabela 10 – Valores obtidos de umidade do BME680. Fonte: Própria.

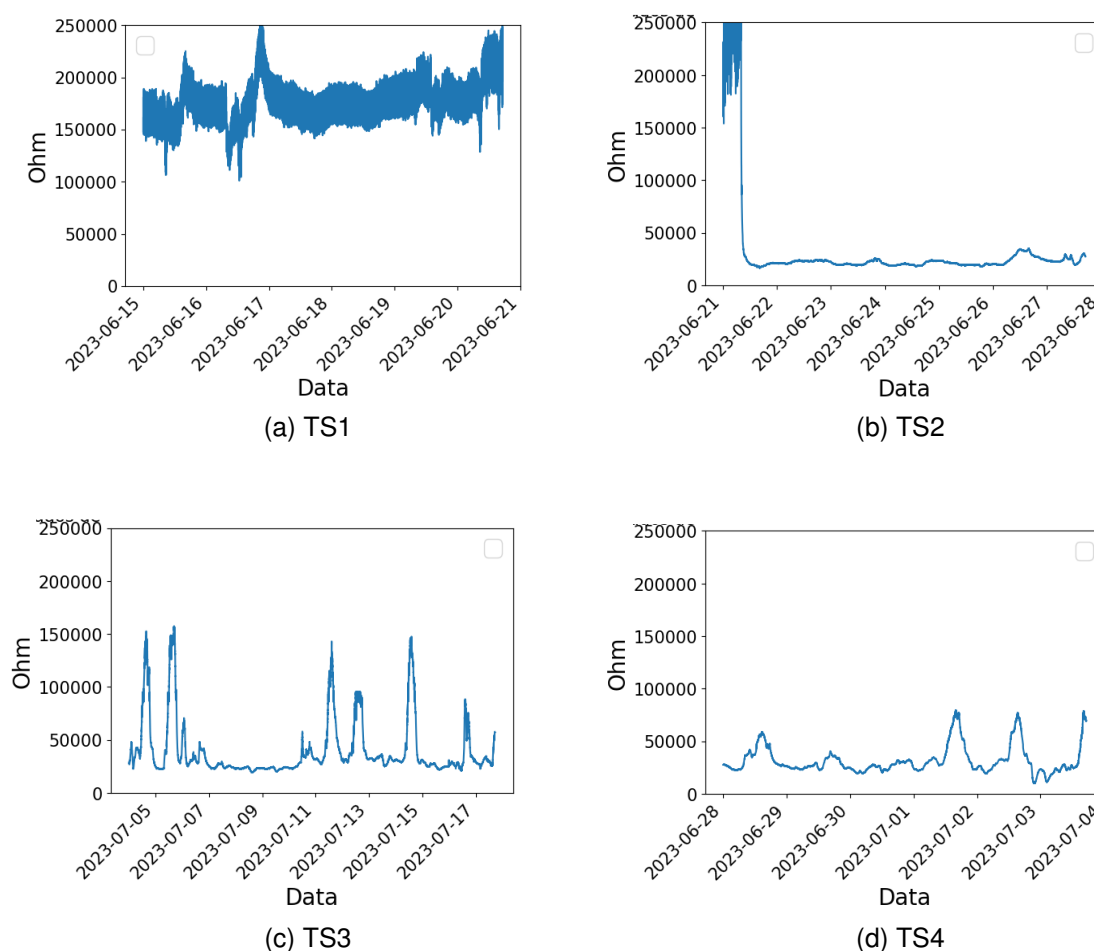
Cenários	Valor máximo	Valor mínimo	Valor médio
TS1	1017.9 hPa	1012.9 hPa	1015.4 hPa
TS2	1017.9 hPa	1014.0 hPa	1015.9 hPa
TS3	1019.9 hPa	1011.3 hPa	1015.6 hPa
TS4	1018.9 hPa	1013.3 hPa	1015.6 hPa

Tabela 11 – Valores obtidos de pressão do BME680. Fonte: Própria.

Cenários	Valor máximo	Valor mínimo	Valor médio
TS1	—	—	—
TS2	35 k Ω	18 k Ω	22.3 k Ω
TS3	157 k Ω	19.3 k Ω	38.6 k Ω
TS4	79.4 k Ω	9.81 k Ω	31.5 k Ω

Tabela 12 – Valores obtidos de resistência elétrica do BME680. Fonte: Própria.

Figura 54 – Séries temporais de resistência



Fonte: Própria.

podem não ser confiáveis são fornecidas no Apêndice B.

A importância de realizar testes práticos em sensores de baixo custo, como o BME680, vai além da simples validação dos dados fornecidos pelo BOSCH (2017). Os testes práticos permitiram uma compreensão mais aprofundada do desempenho e das limitações dos sensores em ambientes reais. Ao submeter esses pequenos componentes de leitura a diferentes cenários experimentais, é possível verificar a precisão, a sensibilidade e a estabilidade das medições em condições variáveis, o que nem sempre é totalmente representado nos dados informados pelo BOSCH (2017). Essa prática possibilitou identificar nuances nos resultados, como a influência de variáveis ambientais sutis, a presença de plantas ou a variação da iluminação, que, como observado, podem impactar significativamente as medições e fornecer informações valiosas para o refinamento das aplicações práticas em campos como agricultura, monitoramento ambiental e aplicações industriais.

6.4.1.4 Considerações sobre as Medições do SGP30

Ao longo do experimento, também obteve-se os gráficos da Figura 55 que representam as leituras de COV obtidas pelo sensor SGP30 nas condições apresentadas pelo experimento. Como pode ser visto, as leituras de COV mostram uma série de picos invulgarmente elevados. Nossas descobertas anteriores indicaram que os níveis de COV deveriam ser da ordem de várias centenas de ppb, mas não mais. Isto é confirmado pelo monitoramento da respiração humana, a Figura 46, e pelo experimento realizado ao ar livre mostrada na Figura 49. Além disso, toda a literatura reporta valores semelhantes, ver, por exemplo, Figura 12. Assim, infelizmente, os níveis de tVOCs nestas séries temporais não parecem ser um bom indicador da presença da planta. Consequentemente, os valores máximo, mínimo e médio não são reportados. No entanto, notamos na série temporal que o espaçamento entre picos parece ser mais regular em TS1 e TS2 em comparação com TS3 e TS4. Assim, o espectro de frequência dos dados pode ser um melhor indicador do impacto da planta.

Note que a Figura 55 representa séries temporais de tCOV para quatro cenários diferentes: TS1 - Cenário com presença da planta e com iluminação periódica (a); TS2 - Cenário com presença da planta sem iluminação (b); TS3 - Cenário sem planta e com iluminação periódica (c); TS4 - Cenário sem planta e iluminação (d).

Leituras de tVOCs e de CO_2 efetivo passam por um processo crucial de compensação de linha de base. No entanto, vale ressaltar que os detalhes dessa compensação não são extensivamente documentados no manual. Num esforço para aumentar a transparência, apresentamos aqui os valores de etanol amostrados ao longo de várias séries temporais. Ao contrário dos valores de COV e CO_2 , esses valores de etanol, juntamente com os níveis de hidrogênio, não são submetidos à compensação. Essa distinção é visualmente representada no diagrama de bloco do sensor 56, enfatizando a natureza não alterada dessas medições de gases específicas. Essa transparência auxilia os usuários a compreender as nuances da saída do sensor e o tratamento específico aplicado a diferentes valores de gases.

O processo de compensação da linha de base da medição no sensor SGP30 é fundamental para garantir a precisão das leituras de qualidade do ar ao longo do tempo. Conforme descrito no Sensirion (2021) do SGP30, a compensação dinâmica da *baseline* é realizada pelo algoritmo de compensação de *baseline* e parâmetros de

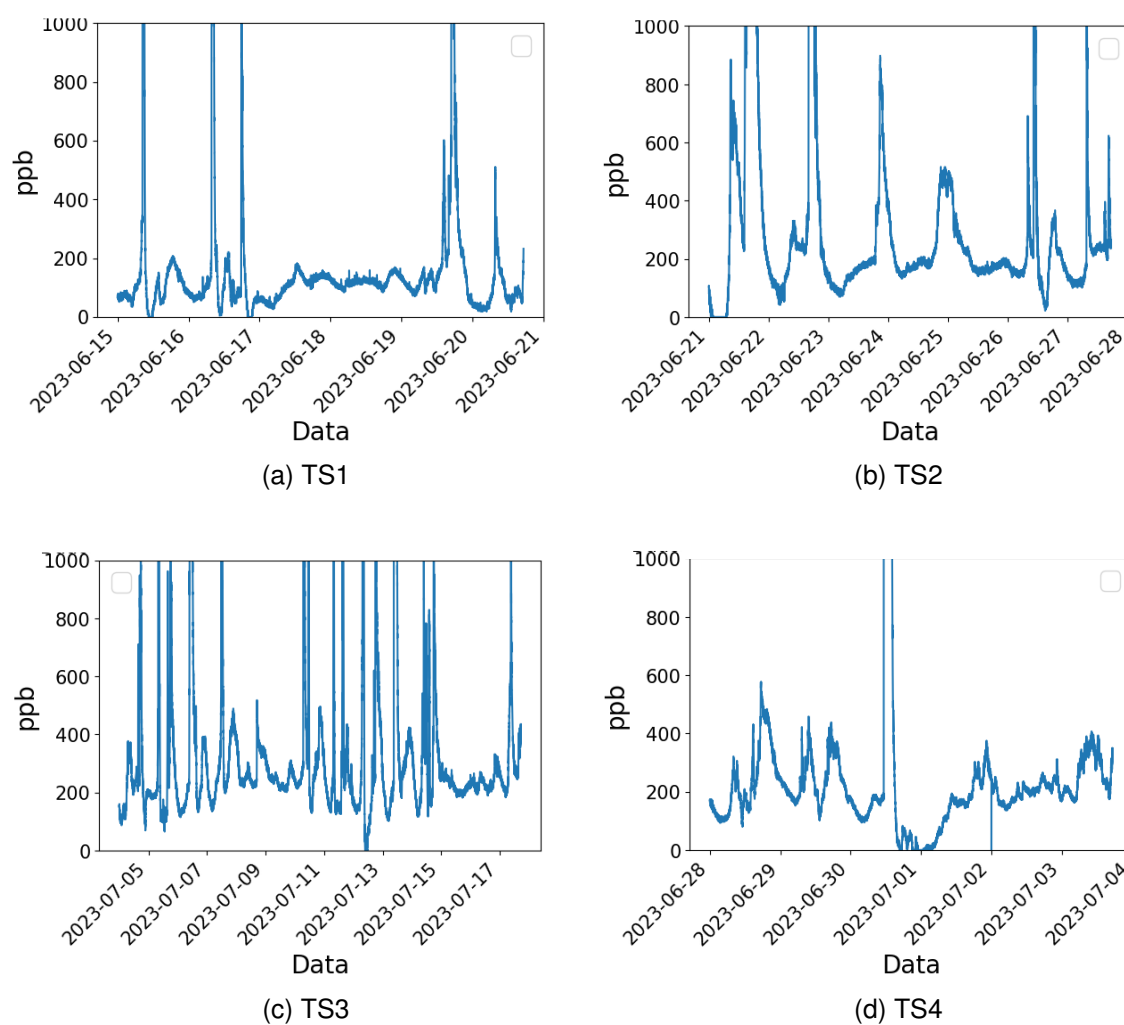


Figura 55 – Séries temporais de COV. Fonte: Própria.

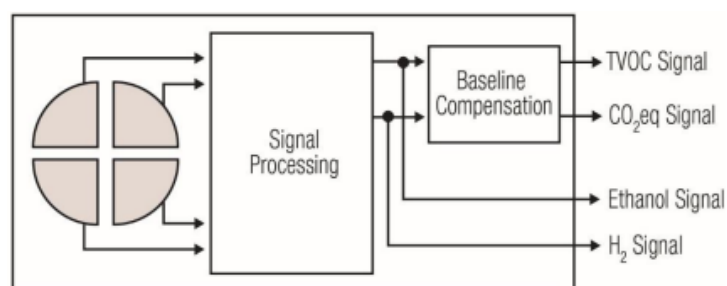


Figura 56 – Diagrama de blocos do SGP30. Fonte: Sensirion (2021)

calibração internos do próprio sensor. Para iniciar a medição da qualidade do ar, é enviado o comando “InitAirQuality”. Após este comando, é necessário enviar o comando “MeasureAirQuality” em intervalos regulares de 1 segundo para assegurar o funcionamento adequado do algoritmo dinâmico de compensação de *baseline*. O sensor então responde com dois bytes de dados (MSB primeiro) e um byte de CRC para cada um dos dois sinais de qualidade do ar pré-processados, na ordem de CO₂eq (partes por milhão - ppm) e COV (partes por bilhão - ppb).

Durante os primeiros 15 segundos após o comando “InitAirQuality”, o sensor entra em uma fase de inicialização na qual o comando “MeasureAirQuality” retorna valores fixos de 400 ppm para CO₂eq e 0 ppb para TVOC. Além disso, o SGP30 permite a leitura e escrita dos valores de *baseline* do algoritmo de correção de *baseline*. Essa funcionalidade é útil para armazenar o *baseline* em intervalos regulares em uma memória externa não volátil e restaurá-lo após um novo ligamento ou reinício suave do sensor. O comando “GetBaseline” retorna os valores de *baseline* para os dois sinais de qualidade do ar, com dois bytes de dados para cada valor, na ordem de CO₂ equivalente e TVOC.

Para restaurar o *baseline* após um ligamento ou reinício suave do sensor, é necessário primeiro enviar o comando “InitAirQuality”, seguido pelo comando “SetBaseline” com os dois valores de *baseline* como parâmetros, na ordem de (TVOC, CO₂eq). Isso permite ao sensor recalibrar-se para condições ambientais atuais, garantindo a precisão contínua das medições. Uma implementação de exemplo para o *driver* do algoritmo de *baseline* pode ser encontrada no documento “SGP30DriverIntegrationGuide” segundo ilustrou Sensirion (2021). É importante ressaltar que um novo comando “InitAirQuality” deve ser enviado após cada ligamento ou reinício suave do sensor para garantir a continuidade da medição da qualidade do ar com base na *baseline* corrigida.

A Figura 57 apresenta os gráficos das medições referentes aos valores brutos que o SGP30 entrega acerca de dados de etanol. Assim como no caso dos sinais tVOC, o sinal do etanol corresponde a uma série de eventos extremos ou rajadas. Portanto, mais uma vez, não são reportados valores máximos, mínimos e médios. O gráfico também mostra que a linha de base do sinal não é zero, confirmando que o sinal não passou por um algoritmo de compensação correspondente. Para reportar sinais de etanol medidos em ppm é necessário um reescalonamento manual dos dados.

Note que a 57 representa as séries temporais de Etanol para quatro cenários dife-

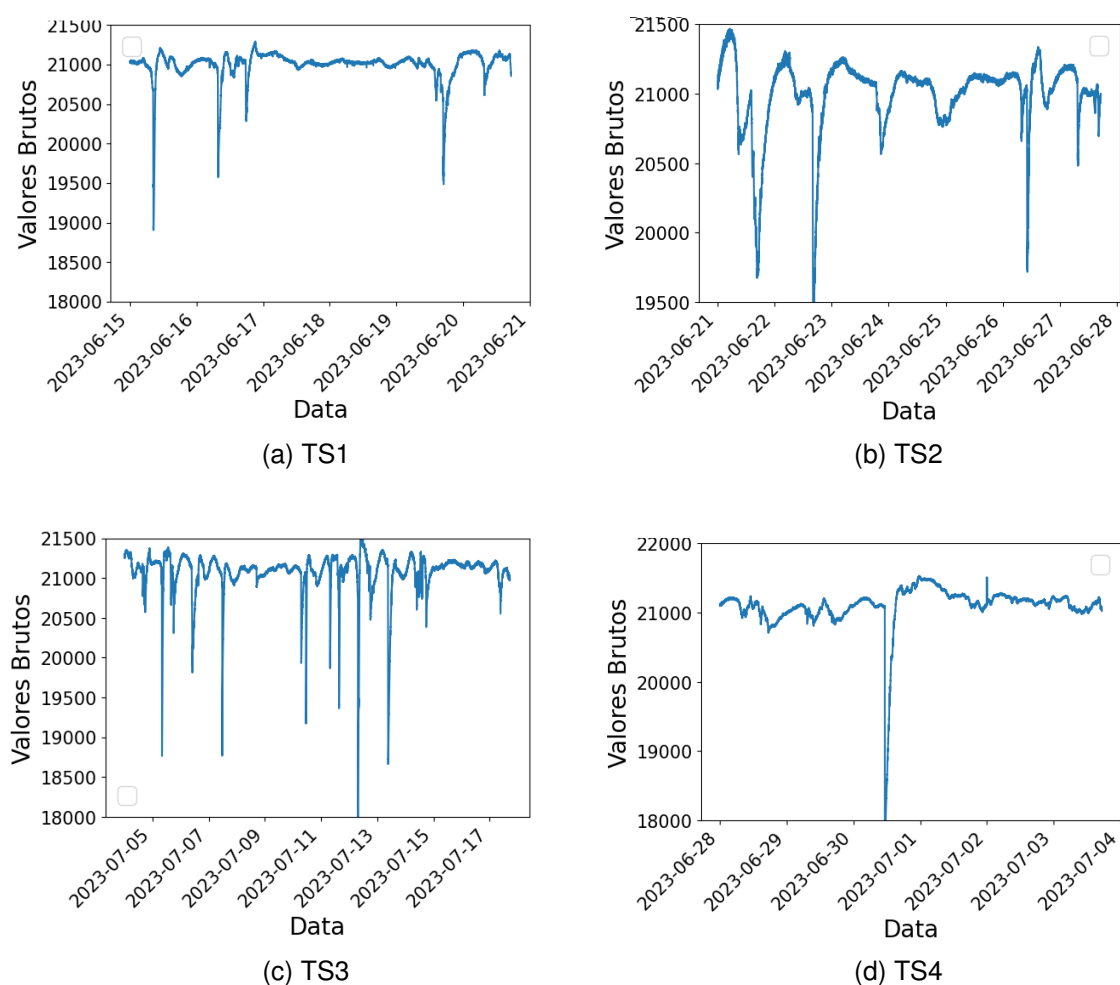


Figura 57 – Séries temporais de Etanol. Fonte: Própria.

rentes: TS1 - Cenário com presença da planta e com iluminação periódica (a); TS2 - Cenário com presença da planta sem iluminação (b); TS3 - Cenário sem planta e com iluminação periódica (c); TS4 - Cenário sem planta e iluminação (d). O SGP30 respeita um cálculo descrito no *datasheet* para transformar os valores brutos em dados de Etanol em ppm (que vai de 0 a 1000ppm). Os gráficos com os valores devidamente tratados estão dispostos na Figura 58. O código de exemplo utilizado para implementar tal característica pode ser observado no Anexo D. Note que a Figura representa as séries temporais de Etanol passando pelo algoritmo de processamento para quatro cenários diferentes: TS1 - Cenário com presença da planta e com iluminação periódica (a); TS2 - Cenário com presença da planta sem iluminação (b); TS3 - Cenário sem planta e com iluminação periódica (c); TS4 - Cenário sem planta e iluminação (d).

As especificações apresentadas por Sensirion (2021) indicam que a faixa de medição de Etanol varia de 0 ppm a 1000 ppm, com um intervalo de medição especificado de 0.3 ppm a 30 ppm. A precisão típica indicada é de cerca de 15% do valor medido,

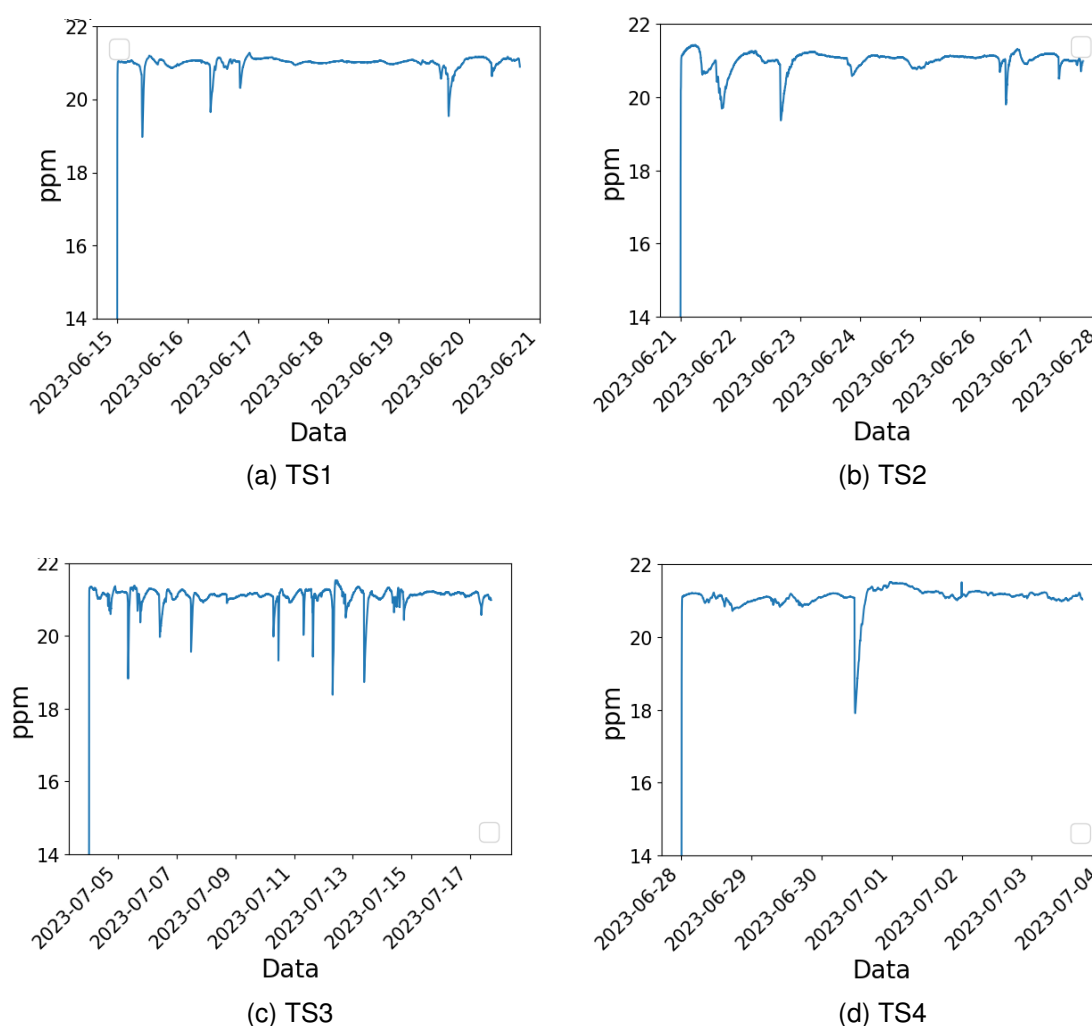


Figura 58 – Séries temporais de Etanol passando pelo algoritmo de processamento. Fonte: Própria.

enquanto o desvio a longo prazo é de aproximadamente 1,3% do valor medido. Além disso, a resolução do sinal de Etanol é de 0,2% do valor medido, demonstrando a sensibilidade do sensor para detectar alterações na concentração desse composto. A Sensirion (2021) também destacou que a frequência de amostragem para o sinal de Etanol pode atingir até 40 Hz, o que permite um acompanhamento detalhado e em tempo real das variações na concentração desse gás ao longo do tempo. Essas informações fornecidas pela Sensirion (2021) corroboram a capacidade do sensor SGP30 de detectar concentrações de Etanol em diferentes ambientes, apoiando os resultados observados nos experimentos.

Esses experimentos, ao submeter a estufa a diferentes condições ambientais e cenários de uso dos sensores, destacaram a importância de sujeitar as especificações dos *datasheets* dos sensores a um teste prático. A documentação técnica fornece informações cruciais sobre as capacidades e limitações dos sensores, mas apenas a

aplicação prática em condições reais pode revelar aspectos não cobertos nos documentos. Através da engenharia reversa e da validação empírica permitiram a compreensão da adequação dos sensores em ambientes reais, onde variáveis incontrolláveis podem influenciar seu desempenho.

Portanto, os experimentos realizados na estufa não apenas corroboram os dados dos *datasheets*, mas também identificam nuances e limitações não explicitamente documentadas, fornecendo uma visão mais abrangente e crítica sobre a eficácia e a precisão dos sensores em condições do mundo real.

6.4.2 Avaliação da Correlação Entre os Parâmetros

O experimento visou apresentar uma análise mais detalhada dos dados temporais supracitados, com o objetivo de obter informações adicionais sobre a influência da presença de plantas nas respostas da qualidade do ar. Nossa investigação se desenvolve em múltiplas frentes, começando com a exploração da correlação entre vários parâmetros medidos. Posteriormente, empregamos a análise de Fourier para revelar as intrincadas assinaturas de tempo incorporadas nos dados tVOC. Além disso, apresentamos uma sofisticada malha de sensores projetada para monitorar simultaneamente o ambiente próximo à planta e a uma distância definida. A malha do sensor amostrou dados ao longo de um mês.

A retenção dos dados ficou concentrada em uma tabela google sheets para posterior exportação para um arquivo google colab onde executou-se uma série de avaliações estatísticas. Para tanto, efetuou-se a análise da matriz de correlação do experimento quando submetido às condições supracitadas; conforme ilustrado na Figura 59.

As matrizes de correlação das variáveis ambientais medidas nas quatro séries temporais descritas na Seção 6.4.1 são mostrados na acima. Perceba que a Figura 59 representa as Matrizes de correlação geradas a partir de dados coletados para quatro cenários diferentes: TS1 - Cenário com presença da planta e com iluminação periódica (a); TS2 - Cenário com presença da planta sem iluminação (b); TS3 - Cenário sem planta e com iluminação periódica (c); TS4 - Cenário sem planta e iluminação (d). Note que, em (b) e (c), a ausência da luz é percebida visualmente por meio das posições em branco.

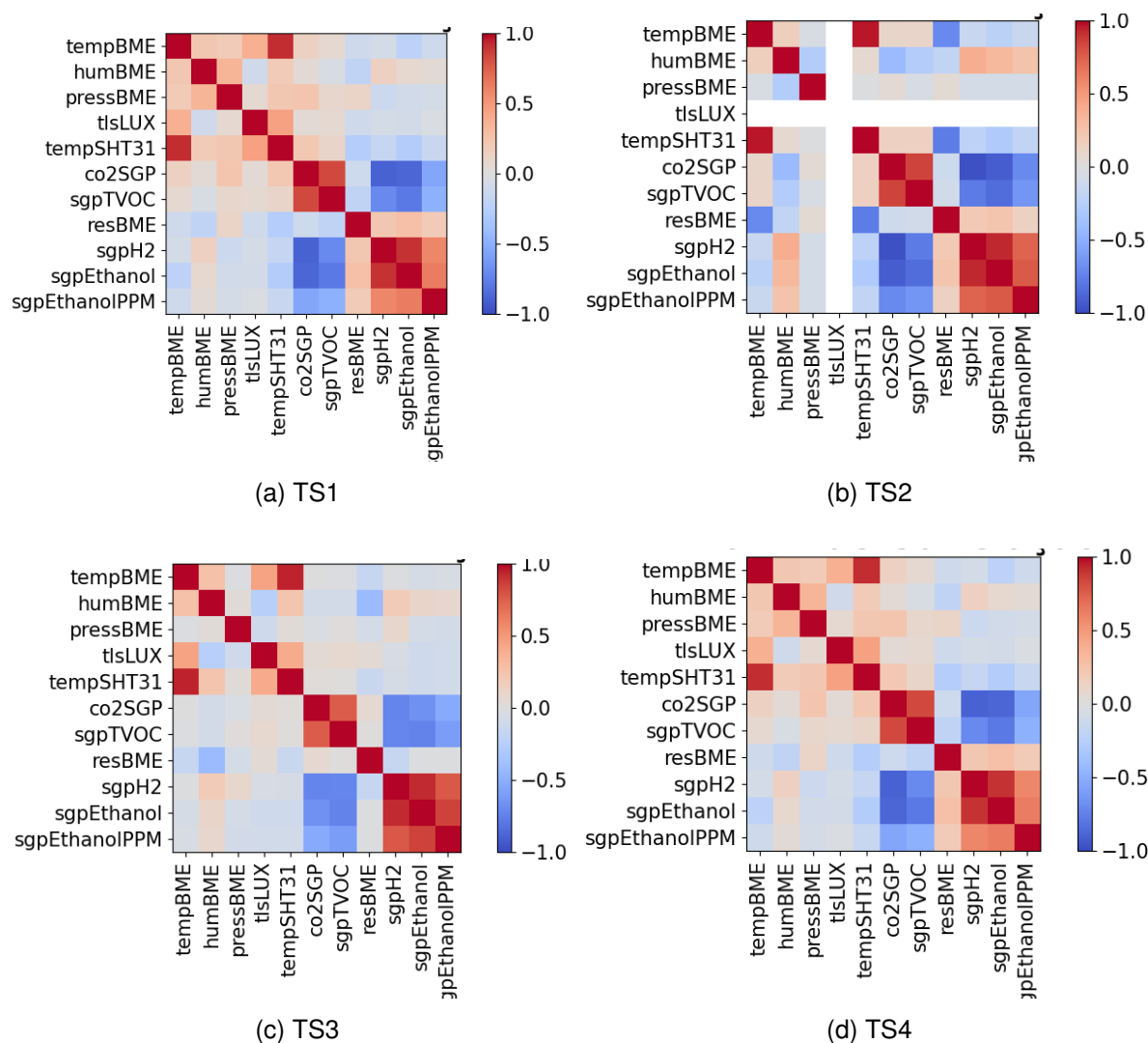


Figura 59 – Matrizes de correlação. Fonte: Própria.

A confirmação de que os sensores SHT31 e BME680 mediram valores semelhantes de temperatura pode ser avaliada pelo fato de que em todas as quatro ilustrações, esses parâmetros se apresentaram em uma relação positiva forte. Observou-se também uma forte correlação positiva do índice de Lux com as temperaturas visto que a fonte de luz além de iluminar também gera calor. Conforme esperava-se, houve uma forte correlação positiva entre as medidas de H_2 e Etanol oriundas do SGP30 uma vez que são dados que passam pelo mesmo sistema de processamento, previsto no diagrama de blocos supracitado. O mesmo acontece quando observou-se nas correlações CO_2 -tVOC. Curiosamente, a correlação entre os sinais dos dois grupos de moléculas, CO_2 e tVOCs versus H_2 e Etanol, é fortemente negativa em todos os quatro cenários. Ainda não está claro se isso aponta para um mecanismo de absorção diferente na superfície de óxido do sensor para os dois grupos de moléculas ou se a

correlação negativa é causada pela compensação da linha de base.

Como nosso objetivo é identificar possíveis assinaturas da presença da planta nos dados de qualidade do ar, focamos na correlação dos três indicadores relacionados: Resistência, COV e etanol. Todos os três indicadores estão apenas fracamente correlacionados com os parâmetros ambientais. Uma exceção é o resistor do sensor BME680 que apresenta alta correlação com temperatura e umidade em algumas séries temporais, veja Figura 59 (b) e (c), respectivamente. Além disso, no TS2, ver Figura 59 (b), observa-se uma pequena correlação positiva entre o sinal do etanol e a umidade ambiente. A dissociação geral observada entre parâmetros ambientais e indicadores de qualidade do ar é um fato importante porque indica que as medições da qualidade do ar monitoram diferentes características do ambiente como os sensores de temperatura, pressão e umidade.

Uma mudança clara nas correlações causada pela presença da planta é difícil de identificar, compare a Figura 59. (a,b) com (c,d). Possivelmente a mudança mais forte está na correlação do sinal do etanol com o sinal resBME. Na presença da planta esta correlação é ligeiramente positiva, o que não é observado na ausência da planta. Deve-se notar que estes dois sinais são recebidos por dois sensores diferentes, ou seja, SGP30 e BME680. Se isto é uma indicação de que a relação ruído-sinal é reduzida, como um possível indicador do impacto da planta verde, permanece, no entanto, especulativo.

Embora não sejam totalmente evidentes, os pontos expostos acima sugerem a possibilidade de que mudanças observadas na correlação entre diferentes sinais de sensores possam ser empregadas para aumentar a capacidade do sensor de perceber a presença da planta e de detectar a influência dos gases emitidos e capturados. Além disso, a discussão revelou que o uso simultâneo de dois sensores de qualidade do ar de baixo custo é vantajoso para a interpretação dos dados medidos.

A matriz de correlação não revela padrões temporais. No entanto, a análise dos dados ao longo do tempo é extremamente importante para compreender o padrão cíclico da produção e emissão de tVOCs. Tal padrão também pode ser utilizado para identificar a assinatura de Arruda nos dados. Portanto, foi necessário avaliar a Transformada de Fourier dos dados considerando as três séries temporais TS1, TS2 e TS3.

6.4.3 Avaliação da Frequência do Ciclo Circadiano de Arruda

Conforme informado, desenvolveu-se a análise da Transformada Rápida de Fourier (FFT) dos dados coletados nos cenários onde a Arruda recebeu acesso a água e luz (TS1); onde a planta foi retirada da estufa (TS3) e onde a planta ficou desprovida de água e luz (TS2). Note que a Figura 60 representa DFT dos sinais tVOCs coletadas quando submeteu-se o sensor em (a) presença de arruda e luz, (b) presença de arruda e ausência de luz e (c) sem a arruda e ausência de luz. Em vermelho, os picos de frequência apresentados na tabela 13. A segunda linha mostra os módulos do coeficiente FFT de dados de Lux gerados a partir de sinais coletadas ao longo do cenário de (d) incidência de luz e presença da planta; (e) de carência de luz e presença da planta e (f) de carência de luz e ausência da planta.

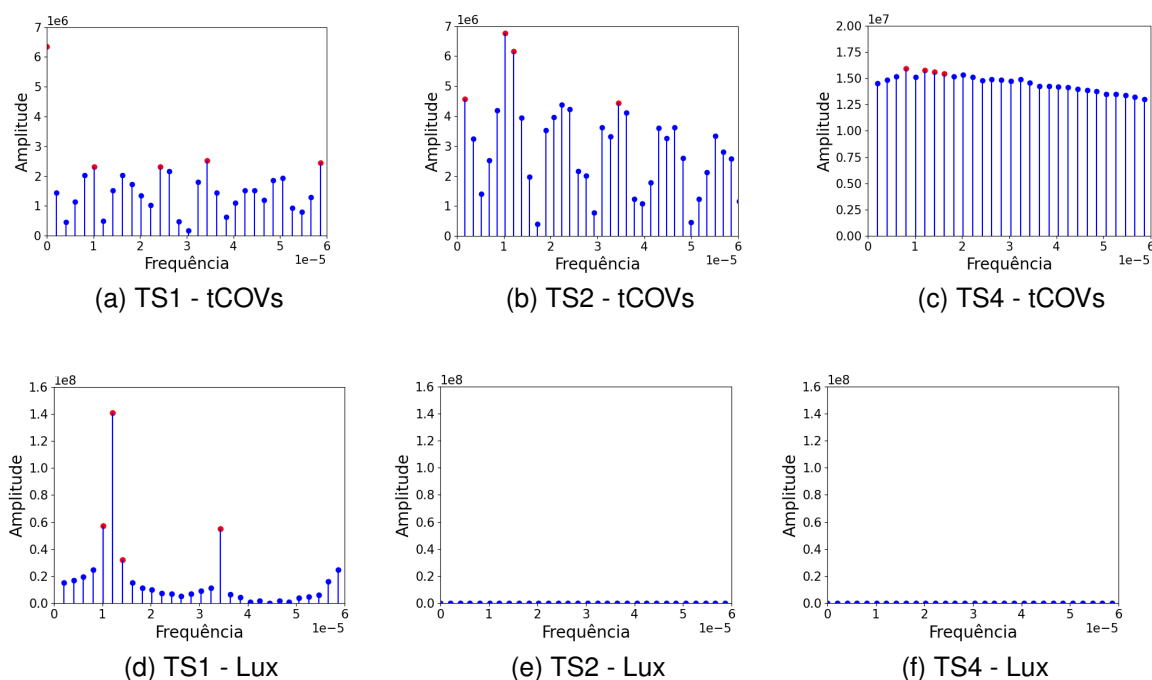


Figura 60 – FFT dos sinais tCOVs (a,b,c) e iluminação (d,e,f). Fonte: Própria.

Cenários	Frequências	Tempo	Amplitude
TS1	0 Hz	–	6.35×10^6
	1.01×10^{-5} Hz	27.5 h	2.31×10^6
	2.43×10^{-5} Hz	11.4 h	2.31×10^6
	3.44×10^{-5} Hz	8.08 h	2.52×10^6
	4.85×10^{-5} Hz	5.72 h	1.87×10^6
	5.87×10^{-5} Hz	4.74 h	2.44×10^6
TS2	0 Hz	–	14.8×10^6
	1.03×10^{-5} Hz	26.9 h	6.77×10^6
	2.24×10^{-5} Hz	12.4 h	4.37×10^6
	3.44×10^{-5} Hz	8.07 h	4.43×10^6
	4.65×10^{-5} Hz	5.97 h	3.61×10^6
	5.51×10^{-5} Hz	5.04 h	3.33×10^6

Tabela 13 – FFT Amplitudes de tCOVs emitido pela planta Arruda em diferentes condições. Fonte: Própria

Os resultados obtidos da análise de DFT dos dados coletados para os três cenários estão apresentados na Tabela 13 para comparação. A análise de Fourier do sensor de gás monitorando as emissões de tVOCs da arruda revela *insights* intrigantes. Os resultados indicam uma semelhança nos espectros obtidos para as séries temporais TS1 e TS2 quando comparados aos de TS3. Na presença da planta, as primeiras três frequências com peso espectral significativo correspondem a aproximadamente vinte e oito horas, doze horas e oito horas. Notavelmente, no contexto de um sinal de luz periódico alternando entre um período de doze horas de iluminação e escuridão, conforme ilustrado na Figura 51 (a), esperamos valores de 24 h (1.16×10^{-5} Hz), 8 h (3.47×10^{-5} Hz) e 4.8 h (5.79×10^{-5} Hz) para as três primeiras frequências. A descoberta notável é que essa periodicidade também é observada em TS2 quando a iluminação artificial é desligada. Essa observação sugere que a planta, mesmo na ausência de estímulos luminosos, segue um ritmo de emissão de COV semelhante a um ciclo de iluminação diurna-noturna.

No entanto, é importante observar que a distribuição dos coeficientes de Fourier em módulo para as duas séries temporais, TS1 e TS2, difere. Uma observação particularmente interessante é que somente no caso de TS2 é observada a diminuição típica dos coeficientes de Fourier com a frequência. É possível perceber também uma tendência rítmica no espectro de frequência de tVOCs para o cenário com e sem luz e presença da Arruda. No terceiro cenário, a ausência de luz e planta faz com que a emissão de tVOCs não se apresente de forma rítmica. Curiosamente, o espectro obtido a partir do sinal COV amostrado sem iluminação é mais semelhante ao obtido nas medições de iluminação, compare Figura 60 (b) e (d). A razão para isto é desconhecida. Uma especulação seria que a condição artificial com desligamento abrupto da iluminação às 05h e desligamento igualmente abrupto às 17h "confunde" a planta. Por outro lado, o espectro obtido para TS3, representando condições na ausência da planta, não apresenta contribuições específicas de frequência. Em resumo, os espectros obtidos pela FFT fornecem evidências convincentes de que os dados de COV amostrados realmente refletem a presença da planta.

6.5 AVALIAÇÃO DA REDE *MESH* DE SENSORES

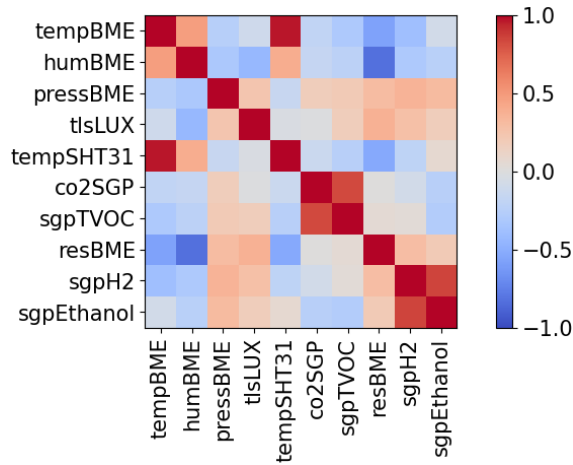
Ao comparar as relações no sensor próximo à planta com o sensor distante, percebeu-se diferenças consideráveis em várias correlações. A relação entre temperatura BME (tempBME) e umidade BME (humBME) corresponde a um exemplo marcante. No sensor próximo à planta, essa relação se apresentou positiva e forte, atingindo 0.47, enquanto no sensor distante foi menor, chegando a 0.33. Isso sugeriu que a presença da planta influencia a interação entre temperatura e umidade, ilustrando uma correlação mais intensa entre esses parâmetros quando a planta está presente.

Além disso, a relação entre tempBME e resBME se apresentou como negativa e forte no sensor próximo à planta (-0.58), entretanto no sensor distante essa relação ficou ainda mais negativa (-0.60). Percebeu-se então que a temperatura tem uma correlação mais acentuada com a resistência do sensor quando a planta está presente, demonstrando uma resposta mais sensível do sensor às variações de temperatura nas proximidades da planta.

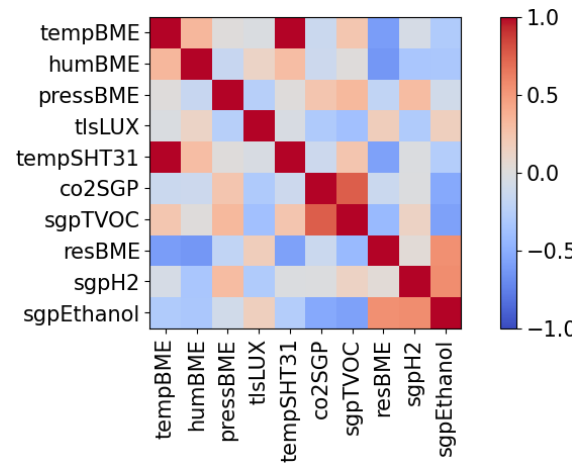
Ao considerar o valor lido de COV do SGP30 (sgpTVOC), a relação entre essa variável e resBME também se apresentou mais significativa e positiva no sensor próximo à planta (0.05) em comparação com o sensor distante que se apresentou negativa e forte (-0.43). Isso sugeriu que a presença da planta pode impactar mais substancialmente na liberação de compostos voláteis, levando a variações mais perceptíveis na resistência do sensor BME.

Todavia, outras relações como a de humBME com sgpTVOC e resBME com a leitura obtida de H₂ do SGP30 (sgpH₂) também demonstraram diferenças notáveis entre os sensores. A correlação entre humBME e sgpTVOC foi fraca ou nula tanto no sensor próximo quanto no distante, porém, a relação entre resBME e sgpH₂ foi mais forte no sensor próximo à planta (0.3) do que no distante (0.033), evidenciando que a presença da planta pode impactar a relação entre a resistência do sensor e a presença de hidrogênio.

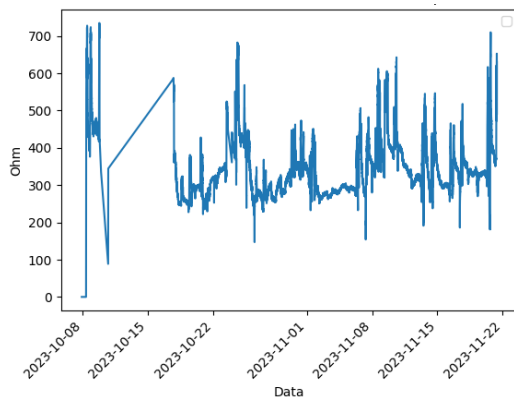
Essas discordâncias indicaram que os sensores próximos e distantes da planta reagem de maneira diferente aos mesmos parâmetros ambientais, destacando a influência da presença da Arruda nos valores e nas relações das variáveis medidas. A resposta mais acentuada do sensor próximo à planta sugere uma sensibilidade ampliada às variações ambientais quando em proximidade com a planta, enfatizando a



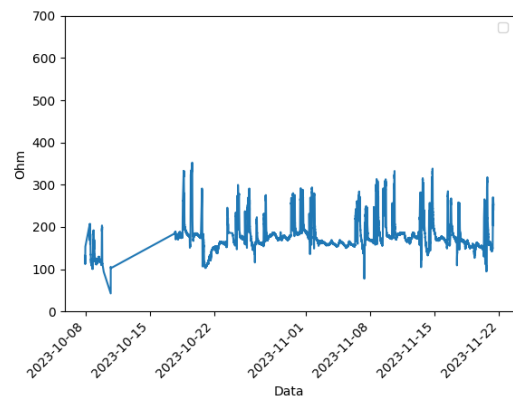
(a) TS1-Correlações, Sensor próximo



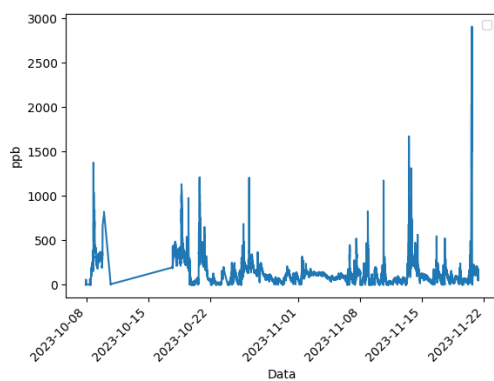
(b) TS1-Correlações, Sensor distante



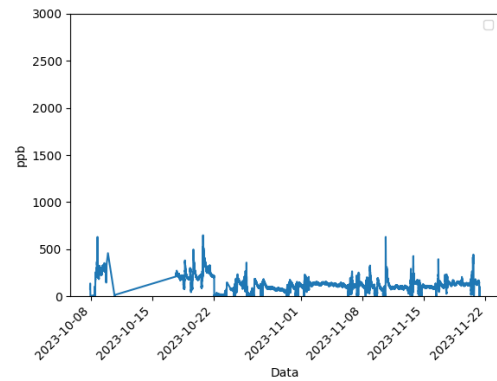
(c) TS1-Resistência, Sensor próximo



(d) TS1-Resistência, Sensor distante



(e) TS1-COV, Sensor próximo



(f) TS1-COV, Sensor distante

Figura 61 – Comparação dos dados gerados pelo sensor próximo e distante da arruda. Fonte: Própria.

capacidade do sensor de identificar e registrar com mais precisão as interações entre os parâmetros ambientais.

No sensor próximo à planta, observou-se que a temperatura BME apresentou uma média de 34.3°C , enquanto no sensor distante foi registrada uma média menor de 30.8°C . Isso permitiu observar uma diferença de aproximadamente 3.5°C entre os sensores, sugerindo uma variação térmica considerável devido à proximidade com a planta.

A umidade BME, por outro lado, manteve-se relativamente consistente entre os sensores, com médias próximas de 55.6% e 57.7% para os sensores próximo e distante, respectivamente. A pressão medida pelo sensor BME680 e outras variáveis como Lux do TSL2561 (tslLux), sgpCO2 e sgpTVOC mostraram médias e valores extremos consideravelmente similares entre os dois sensores, indicando uma menor influência da presença da planta nessas medições específicas. No entanto, o sensor próximo à planta está orientado para baixo em direção à planta, em contraste com o outro sensor, que aponta para cima. Como resultado, a intensidade de iluminação próxima à planta é menor que aquela amostrada a uma distância maior. Além disso, como discutido anteriormente, os valores médios nem sempre são um bom indicador do impacto da planta, especialmente para medições compensadas de linha de base, como o sinal COV.

Entretanto, ao analisar a resistência medida pelo sensor BME680 e os gases H_2 e Etanol pelo SGP30, observou-se discrepâncias notáveis. O sensor próximo à planta demonstrou uma média de resistência BME680 de $342\ \Omega$, com um valor máximo de $735\ \Omega$, enquanto o sensor distante registrou uma média inferior de $174\ \Omega$ e um valor máximo de $352\ \Omega$. Essa diferença substancial sugere uma influência mais acentuada da planta na resistência do sensor BME680 quando em proximidade.

Além disso, as médias de H_2 e Etanol, medidos pelo SGP30, também apresentaram variações consideráveis entre os sensores. No sensor próximo à planta, a média foi de 14424 para H_2 e 20102 para Etanol, enquanto no sensor distante, as médias foram 13683 e 19092, respectivamente. Isso sugere uma possível contribuição da presença da planta na liberação desses gases, influenciando as medições do sensor.

Em síntese, embora algumas variáveis tenham mostrado consistência entre os sensores próximo e distante da planta, como umidade, pressão e outras medições ambientais, notamos variações significativas nas medições de temperatura, resistên-

cia BME680 e na presença de determinados gases como H_2 e Etanol, sugerindo uma influência considerável da planta nessas variáveis específicas.

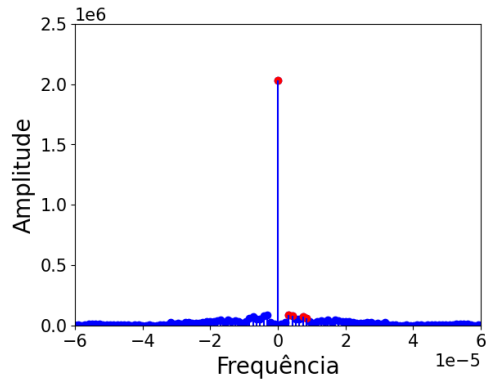
Os gráficos da Figura 61 (b,e) representam os gráficos da leitura de resistência do BME680 ao longo de todo o experimento dos sensores próximo e distante da planta. Por meio da análise gráfica, é possível perceber que o sensor próximo da planta obteve valores de resistência bem mais baixos quando comparamos com o outro sensor. Os gráficos da Figura 61(c,f) representam os gráficos da leitura de COV do SGP30 ao longo de todo o experimento dos sensores próximo e distante da planta. Por meio da análise gráfica, é possível perceber que o sensor próximo da planta obteve valores de COV maiores quando comparamos com o outro sensor.

Além da coleta de dados dos sensores próximos e distantes da planta de arruda, realizamos a FFT sobre esses dados com o intuito de investigar as características de frequência e padrões presentes nas medições de COV, resistência e lux. A aplicação da FFT visou identificar e analisar possíveis padrões cíclicos ou variações de frequência nos valores obtidos, a fim de fornecer *insights* adicionais sobre as interações entre a presença da arruda e as variáveis ambientais monitoradas pelos sensores. As Figuras 62 e 63 apresentam os gráficos acerca deste assunto. De modo que, em 63, os gráficos foram plotados em dB.

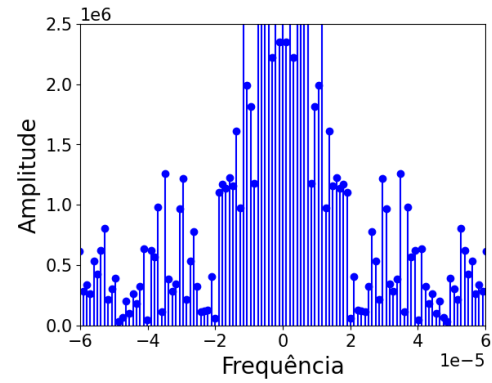
Os dados coletados do sensor próximo e do sensor distante da planta de arruda revelaram diferenças significativas nas medições de COV, resistência e lux, destacando a influência da presença da planta no ambiente monitorado. Em relação aos níveis de COV, o sensor próximo à arruda registrou valores mais elevados em comparação com o sensor distante. Especificamente, os picos de COV mostraram-se consistentemente maiores no sensor próximo, indicando uma possível emissão ou interação de compostos orgânicos voláteis associados à planta de arruda.

Quanto à resistência medida pelo sensor BME680, observou-se uma tendência de variação nos valores registrados entre o sensor próximo e o sensor distante da planta. Enquanto o sensor próximo indicou valores mais altos em determinados momentos, o sensor distante apresentou medições menores de resistência. Essa discrepância pode sugerir uma diferenciação na qualidade do ar ou nas condições ambientais imediatamente influenciadas pela presença da arruda.

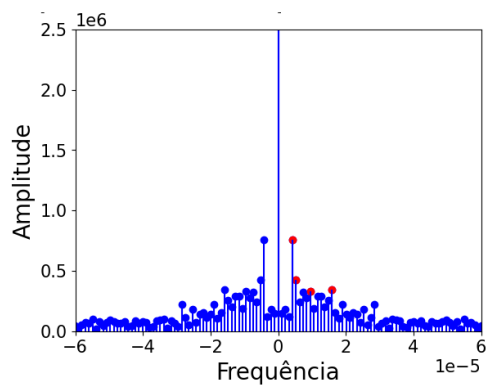
No que concerne à iluminação (lux), os dados coletados pelo sensor revelaram variações significativas entre as medições próximas e distantes da planta. O sensor



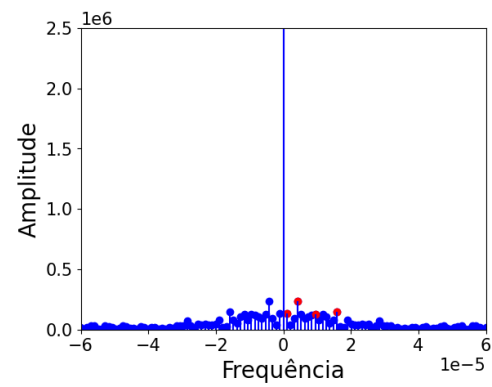
(a) TS1-Lux, Sensor próximo



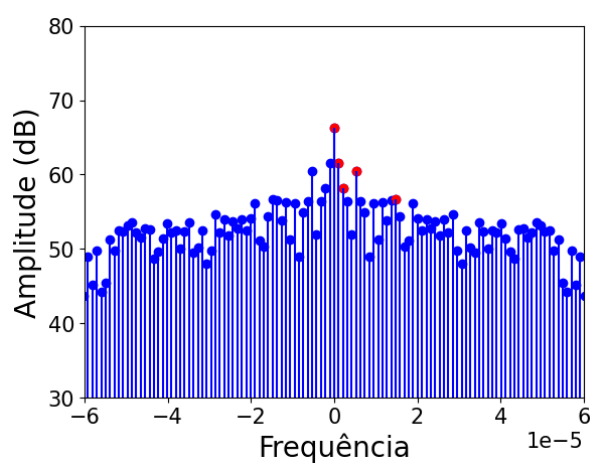
(b) TS1-Lux, Sensor distante



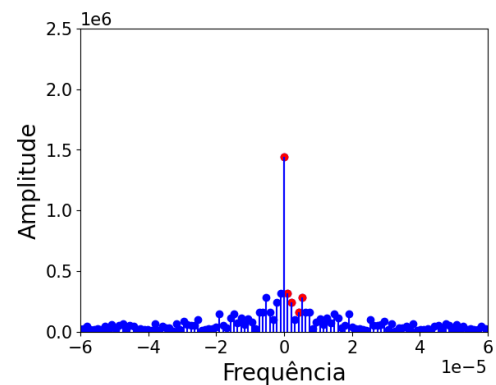
(c) TS1-Resistência, Sensor próximo



(d) TS1-Resistência, Sensor distante

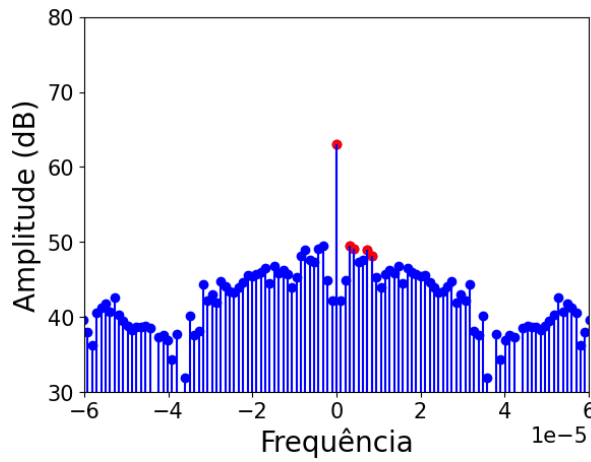


(e) TS1-COV, Sensor próximo

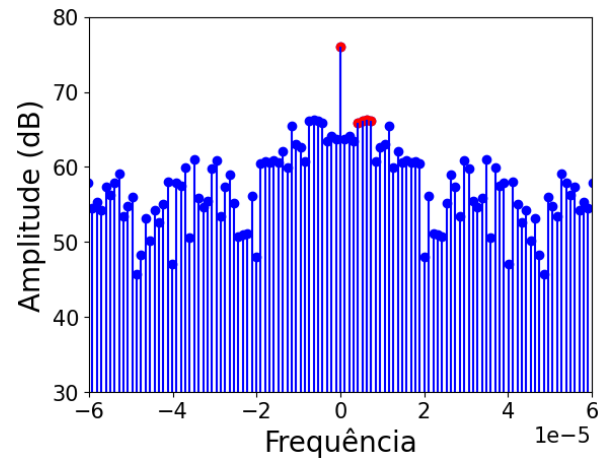


(f) TS1-COV, Sensor distante

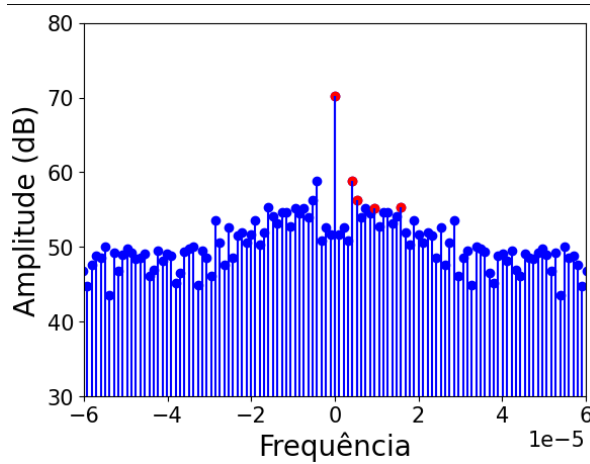
Figura 62 – Comparação dos dados gerados pelo sensor próximo e distante da arruda. Fonte: Própria.



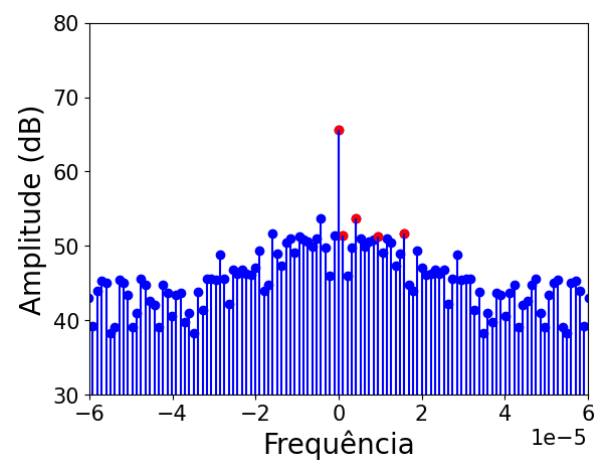
(a) TS1-Lux, Sensor próximo



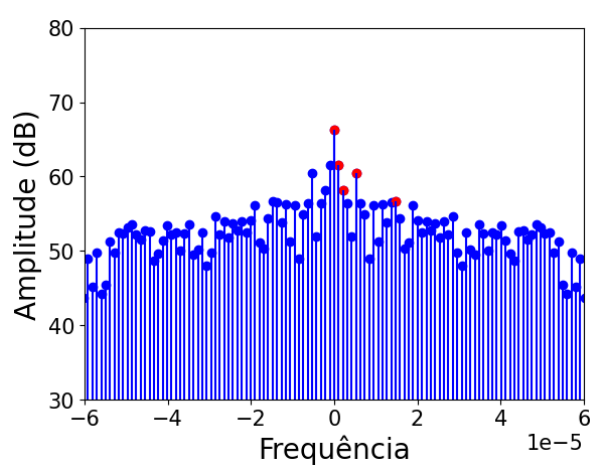
(b) TS1-Lux, Sensor distante



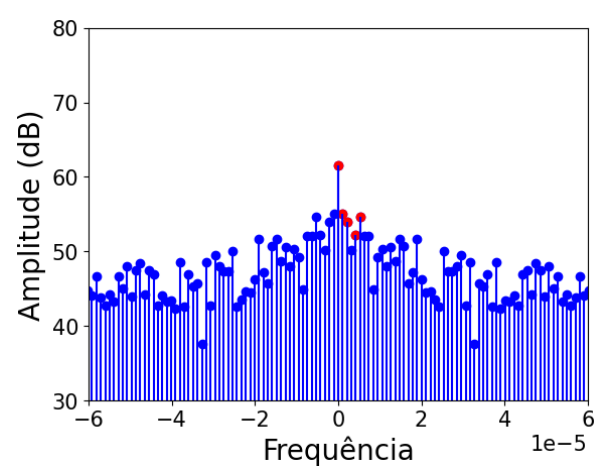
(c) TS1-Resistência, Sensor próximo



(d) TS1-Resistência, Sensor distante



(e) TS1-COV, Sensor próximo



(f) TS1-COV, Sensor distante

Figura 63 – Comparação dos dados gerados pelo sensor próximo e distante da arruda em dB. Fonte: Própria.

localizado próximo à arruda apresentou níveis mais baixos de lux, indicando uma possível obstrução ou influência direta da planta na incidência de luz. Por outro lado, o sensor distante reportou valores mais altos de iluminação, presumivelmente menos afetado pela presença da arruda.

A comparação dos dados coletados sugere uma clara distinção entre os ambientes imediatamente próximos e distantes da planta de arruda. A presença da arruda parece influenciar os níveis de tVOC, resistência e lux, destacando seu potencial impacto na qualidade do ar e nas condições ambientais próximas. No entanto, é importante considerar outras variáveis e fatores ambientais que podem contribuir para as diferenças observadas nos dados coletados, exigindo análises mais aprofundadas para uma compreensão abrangente dessas relações.

6.6 RESUMO

O presente capítulo descreveu os resultados dos experimentos elaborados ao longo da pesquisa. O experimento realizado para avaliar a alocação de folha de papel queimada em diferentes pontos de um plano, utilizando dois Transdutores Inteligentes Versão I, revelou que a sensibilidade do CCS811 é acentuada em uma distância de trinta centímetros. Todavia, os parâmetros de temperatura e umidade do DHT22 não foram afetados pela presença da folha de papel queimada, indicando uma limitação na capacidade de resposta; observada pelos LEDs indicadores. Além disso, foi observado que existe uma região entre os dois transdutores utilizados onde a rede não consegue determinar qual nó está mais próximo da fonte, revelando limitações no algoritmo proposto e na medição do CCS811. Além disso, conforme citado por Catini et al. (2019); o CCS811 apresenta problemas de detecção quando exposto a extremos de umidade.

Outro experimento que investigou os limites de detecção do SGP30 demonstrou que os níveis de COV medidos aumentaram quando o pesquisador respirava próximo ao dispositivo, retornando a níveis próximos de zero quando afastado. O teste com uma folha de papel perfumada confirmou o limite teórico do componente. A análise das séries temporais dos sensores revelou informações consistentes com as especificações dos dados, além de identificar limitações não documentadas, fornecendo uma compreensão mais abrangente da eficácia dos sensores em condições reais. Um terceiro experimento focou na análise da periodicidade dos sinais de dois Transdutores Inteligentes Versão II por meio do algoritmo de FFT. Os resultados mostraram semelhanças nos espectros de COVs entre os transdutores, sugerindo uma influência do ambiente na resposta da planta. A presença da planta foi confirmada pela análise dos dados de COV amostrados.

Um último experimento envolvendo uma rede mesh com dois Transdutores Versão II e um nó-raiz revelou diferenças significativas nas correlações entre os sensores próximos e distantes da planta, indicando respostas distintas dos sensores aos mesmos parâmetros ambientais quando em proximidade com a planta. A presença da Arruda mostrou ter um impacto significativo nas variáveis monitoradas, destacando a necessidade de análises mais detalhadas para compreender completamente essas relações em diferentes condições ambientais.

7 CONCLUSÃO

O crescente surgimento de doenças e pragas em plantações agrícolas vem sendo considerado uma preocupação de destaque no cenário agrícola brasileiro. Diante deste desafio, torna-se necessário explorar métodos eficazes de detecção de sinais referente a saúde de plantações agrícolas. Com o intuito de abordar essa problemática, este trabalho propôs uma análise sobre a transformação digital que as WSNs podem introduzir no ambiente agrícola, estimulando pesquisas futuras nesse domínio. A avaliação do uso de sensores de qualidade do ar de baixo custo se destaca, buscando monitorar a respiração e a emissão de compostos orgânicos voláteis por culturas, indicadores cruciais para a saúde das plantas; considerando o que foi exposto nos conceitos fundamentais.

A dissertação apresentou uma compilação minuciosa sobre os limites de força de sinal e sensibilidade de sensores comuns de qualidade do ar; como o CCS811 e o BME680. Utilizando dados provenientes de diferentes fontes, como respiração humana, perfume e nuvens de fumaça de papel queimado, os experimentos ofereceram informações sobre os princípios de funcionamento dos sensores de qualidade do ar e sua aplicabilidade no monitoramento de culturas.

O experimento referente a alocação de folha de papel queimada em pontos distintos de um plano composto por dois Transdutores Inteligentes Versão I revelou que e em uma distancia de trinta centímetros, a sensibilidade do CCS811 é acentuada. Contudo, o mesmo não pode ser observado sobre os parâmetros de temperatura e umidade medidos pelo DHT22; dado que os LEDs de indicação visual de temperatura e umidade não responderam aos estímulos influenciados pela presença da folha de papel queimada. Os parâmetros do DHT22 foram estimulados apenas nos momentos de extrema proximidade (5cm ou menos) da folha de papel queimada. Além disso, os resultados apontam para uma região entre os dois transdutores em que a rede não consegue distinguir qual nó está mais próximo da fonte. Isso denota limite de resolução do algoritmo proposto e da medição do CCS811.

O experimento acerca dos limites de detecção do SGP30 resultaram na observação que o nível de COV medido subiu para 250ppb a medida que o pesquisador respirava nas proximidades do dispositivo. Quando o pesquisador se afastou do sensor, os

níveis de COV caíram novamente para zero ou quase zero. Uma folha de papel perfumada foi agitada sobre o SGP30 por um período de 5 minutos. Esse teste confirmou o limite teórico descrito na folha de dados do componente de 60000ppb.

A avaliação dos séries temporais dos sensores considerando os cenários distintos em que a Arruda foi submetida revelaram que as leituras dos sensores TSL2561, BME680, SGP30 e SHT31 não apenas corroboram as informações das folhas de dados, mas também identificam limitações não explicitamente documentadas, fornecendo uma visão mais abrangente e crítica sobre a eficácia e a precisão dos sensores em condições do mundo real. Devido a isso, Tornou-se necessária a avaliação da periodicidade dos sinais de dois Transdutores Inteligentes Versão II através da submissão dos dados ao algoritmo de FFT descrito.

O experimento consistiu na análise da FFT dos dados coletados nos quatro cenários distintos descritos. Lembrando ao leitor que as quatro séries temporais registradas referem-se a: TS1 - Iluminação periódica na presença de planta; TS2 - Sem iluminação na presença de planta; TS3 - Iluminação periódica na ausência de planta e TS4 - Sem iluminação na ausência de planta (controle). A análise, conduzida ao longo de uma semana para cada cenário, revelou que os espectros obtidos para TS1 e TS2 mostraram semelhanças, indicando periodicidade nas emissões de COVs, mesmo na ausência de estímulos luminosos em TS2. Surpreendentemente, a planta seguiu um ritmo de emissão semelhante a um ciclo de iluminação diurna-noturna, mesmo na ausência de luz. No entanto, a distribuição dos coeficientes de Fourier em módulo diferiu entre TS1 e TS2, sugerindo uma influência do ambiente na resposta da planta. O espectro de COVs para TS3, representando a ausência da planta, não apresentou contribuições específicas de frequência. Em suma, os resultados da FFT forneceram evidências convincentes de que os dados de COV amostrados refletem de fato a presença da planta.

O experimento referente a detecção da periodicidade Dia-Noite da emissão de COVs objetivou investigar a capacidade do dispositivo desenvolvido em detectar a presença e padrões temporais de COVs emitidos por amostras de arruda. Esse procedimento revelou que iluminação oscilou entre dia e noite. Notavelmente, a emissão de COVs apresentou um padrão cíclico com níveis mais altos durante o dia, indicando uma resposta metabólica da arruda às variações de luz no ambiente. Apesar da estabilidade de outros fatores ambientais, como umidade, temperatura e pressão, a análise

revelou um aumento geral nos níveis de COV durante o período de monitoramento no primeiro experimento. A avaliação das matrizes de correlação também revelaram a forte correlação positiva entre as temperaturas dos sensores SHT31 e BME680. Observou-se correlações positivas entre índice de Lux e temperaturas, enquanto H₂ e Etanol, assim como CO₂ e COVs, apresentaram correlações positivas devido ao processamento conjunto. No entanto, a correlação negativa entre CO₂/COVs e H₂/Etanol indica diferenças na absorção ou possível compensação da linha de base. Focando nos indicadores relacionados à presença da planta, como Resistência, COV e etanol, notou-se uma dissociação geral em relação aos parâmetros ambientais.

O experimento envolvendo a rede mesh composta por dois Transdutores Inteligentes Versão II e o nó-raiz revelou que as correlações apresentaram diferenças marcantes entre o sensor próximo à planta e o sensor distante, especialmente nas relações entre temperatura e umidade, resistência e temperatura, e COV e resistência. Essas discrepâncias indicaram respostas distintas dos sensores aos mesmos parâmetros ambientais quando em proximidade com a planta. Observou-se também que o sensor próximo à planta apresentou uma resposta mais sensível às variações de temperatura, uma variação térmica significativa e uma possível influência da planta na liberação de gases como H₂ e Etanol. A análise dos gráficos de resistência e COV ao longo do experimento destacou diferenças substanciais entre os sensores, reforçando a conclusão de que a presença da Arruda tem um impacto significativo nas variáveis monitoradas. A comparação dos dados coletados indicou uma clara distinção entre os ambientes próximos e distantes da planta de Arruda, evidenciando seu potencial impacto na qualidade do ar e nas condições ambientais imediatas. No entanto, destaca-se a necessidade de análises mais detalhadas para uma compreensão completa dessas relações, considerando outras variáveis e fatores ambientais.

Os resultados e discussões ressaltam a viabilidade do desenvolvimento de sistemas de sensoriamento inteligente com transdutores de custo reduzido, capazes de identificar a presença de plantas e avaliar sua saúde. Os artigos citados descreveram técnicas para a detecção de gases emitidos por plantas, destacando a importância da frequência de emissão. A descrição prática dessas técnicas foi essencial para consolidar o entendimento do funcionamento.

Experimentos adicionais em condições controladas tornam-se essenciais para compreender as complexidades da assinatura da planta e correlacionar os sinais com seu

estado de saúde. Destaca-se a necessidade do uso redundante de sensores de qualidade do ar integrados em uma plataforma para mitigar problemas de confiabilidade, considerando a propensão desses sensores a falhas. Os resultados orientam para a elaboração de uma rede de sensores mesh, solucionando desafios de transmissão de dados de maneira acessível e eficaz, além de permitir a adição dos dados a algoritmos de processamento para avaliações mais precisas. No entanto, investigações adicionais são requeridas para aprimorar o protocolo de comunicação e a disposição dos dispositivos em campo. Explorar estudos sobre gestão de energia, tratamento de dados e a aplicação de sistemas de predição e classificação para uma utilização mais eficaz dos sensores no ambiente agrícola representa um enfoque crucial para avanços significativos na detecção precoce de problemas fitossanitários, promovendo práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

Além dos resultados obtidos, é relevante mencionar que um artigo derivado desta pesquisa foi publicado no IEEE, intitulado "Monitoring the Daily Rhythm of Total Green Leaf Volatiles with a Low-Cost Multi-Sensor Node" pelos autores Filipe Cardoso e Stefan Blawid. Este trabalho apresenta uma contribuição significativa para a comunidade acadêmica. A documentação completa do projeto pode ser encontrada no GitHub: <https://github.com/FilipeMesel/mestrado>.

Esta dissertação não apenas oferece informações valiosas sobre o potencial das redes de sensores sem fio na agricultura, mas também sublinha a importância do design robusto de sensores para aquisição de dados confiáveis, preparando o terreno para avanços futuros na dinâmica área da agricultura de precisão.

REFERÊNCIAS

- AKERLUND, M.; NYLÉN, D. From technology speculation to value creation: The changing discourse and actants in the construction of iot on twitter. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.5210/fm.v26i12.11485>>.
- AL-FUQAHA, A.; GUIZANI, M.; MOHAMMADI, M.; ALEDHARI, M.; AYYASH, M. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>>.
- ALFANO, B.; BARRETTA, L.; GIUDICE, A. D.; VITO, S. D.; FRANCA, G. D.; ESPOSITO, E.; FORMISANO, F.; MASSERA, E.; MIGLIETTA, M. L.; POLICHETTI, T. A review of low-cost particulate matter sensors from the developers' perspectives. *Sensors*, MDPI, v. 20, n. 23, p. 6819, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s20236819>>.
- AMS. *TSL2561 Luminosity Sensor*. 2013. <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- AMS. *CCS811 Environmental Sensor Datasheet*. 2018. <https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- ANURAG, D.; ROY, S.; BANDYOPADHYAY, S. Agro-sense: Precision agriculture using sensor-based wireless mesh networks. In: *2008 First ITU-T Kaleidoscope Academic Conference - Innovations in NGN: Future Network and Services*. [s.n.], 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/kingn.2008.4542291>>.
- ARAUJO, J. V. G. A.; SANTOS, M. dos; GOMES, C. F. S. *DESENVOLVIMENTO DE UM CÓDIGO EM PYTHON PARA GERAÇÃO DE MATRIZES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON COM LAÇOS A PARTIR DE "N" VARIÁVEIS TOMADAS DUAS A DUAS*. 2019. Disponível em: <<https://pdf.blucher.com.br/marineengineeringproceedings/spolm2019/080.pdf>>.
- AYDIN, S.; AYDIN, M. N. A sustainable multi-layered open data processing model for agriculture: lot based case study using semantic web for hazelnut fields. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, v. 5, n. 2, p. 309–319, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.25046/aj050241>>.
- BALAJI, S.; NATHANI, K.; SANTHAKUMAR, R. Iot technology, applications and challenges: A contemporary survey. *Wireless Personal Communications*, v. 110, n. 1, p. 721–766, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11277-019-06407-w>>.
- BARI, S. M. S.; ANWAR, F.; MASUD, M. H. Performance study of hybrid wireless mesh protocol (HWMP) for IEEE 802.11s WLAN mesh networks. In: *2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE)*. [s.n.], 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/iccce.2012.6271309>>.
- BECK, J. J.; ALBORN, H. T.; BLOCK, A. K.; CHRISTENSEN, S. A.; HUNTER, C. T.; RERING, C. C.; SEIDL-ADAMS, I.; STUHL, C. J.; TORTO, B.; TUMLINSON,

J. H. Interactions among Plants, Insects, and Microbes: Elucidation of Inter-Organismal Chemical Communications in Agricultural Ecology. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 66, n. 26, p. 6663 – 6674, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01763>>.

BOSCH. *BOSCH BME680: Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor*. 2017. <<https://datasheet.octopart.com/BME680-Bosch-Tools-datasheet-130009105.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2023.

BOUWMEESTER, H.; SCHUURINK, R. C.; BLEEKER, P. M.; SCHIESTL, F. The role of volatiles in plant communication. *The Plant Journal*, v. 100, n. 5, p. 892–907, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1105/tpc.16.00898>>.

BRUN-LAGUNA, K.; DIEDRICHS, A. L.; DUJOVNE, D.; TAFFERNABERRY, C.; LÉONE, R.; VILAJOSANA, X.; WATTEYNE, T. Using smartmesh ip in smart agriculture and smart building applications. *Computer Communications*, v. 121, p. 83–90, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.03.010>>.

CARDOSO, F.; BLAWID, S. Monitoring the daily rhythm of total green leaf volatiles with a low-cost multi-sensor node. In: *2022 Symposium on Internet of Things (SloT)*. [s.n.], 2022. p. 1–4. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/SloT56383.2022.10069883>>.

CATINI, A.; PAPALE, L.; CAPUANO, R.; PASQUALETTI, V.; GIUSEPPE, D. D.; BRIZZOLARA, S.; TONUTTI, P.; NATALE, C. D. Development of a sensor node for remote monitoring of plants. *Sensors*, v. 19, n. 22, p. 4865, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s19224865>>.

CAZORLA, I. M. *Média Aritmética: Um Conceito Prosaico e Complexo*. 2000. Disponível em: <https://www.inec.gob.pa/iasi/docs/Papers_IX_Seminario/apresentacao%20oral/C017_artigo%20cazorla.pdf>.

CHENG, S.; FU, X.; MEI, X.; ZHOU, Y.; DU, B.; WATANABE, N.; YANG, Z. Regulation of biosynthesis and emission of volatile phenylpropanoids/benzenoids in petunia× hybrida flowers by multi-factors of circadian clock, light, and temperature. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 107, p. 1–8, 2016. ISSN 0981-9428. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.026>>.

CILFONE, A.; DAVOLI, L.; BELL, L.; FERRARI, G. Wireless mesh networking: An iot-oriented perspective survey on relevant technologies. *Future Internet*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 4, p. 99, 2019. Submission received: 7 February 2019 / Revised: 30 March 2019 / Accepted: 10 April 2019 / Published: 17 April 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/fi11040099>>.

CO., L. Z. W. E. T. *Air Quality Gas Sensor Model MQ-135*. 2015. Documento técnico. Disponível em: <[https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20\(Ver1.4\)%20-%20Manual.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20(Ver1.4)%20-%20Manual.pdf)>.

CURVELLO, A. *Apresentando o módulo ESP8266*. 2021. Acesso em 02 ago. 2021. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/modulo-esp8266/>>.

DEROUSSI, A.; MADI, A. A.; ALIHAMIDI, I.; CHARAF, L. A.; SABER, M.; ERRAOUI, A.; ADDAIM, A. A novel autonomous remote system applied in agriculture using transmission control protocol. *International Journal of Reconfigurable*

and Embedded Systems (IJRES), Institute of Advanced Engineering and Science (IAES), v. 11, n. 1, p. 1–12, 2022. ISSN 2089-4864. Disponível em: <<https://doi.org/10.11591/ijres.v11.i1.pp1-12>>.

EEMB. *Lithium-ion Battery Data Sheet*. Shenzhen, 2010. Disponível em: <<https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAAItem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>>.

ELECTRONICS, R. *MG-811 Carbon Dioxide Sensor Module*. 2020. Disponível em: <<https://5.imimg.com/data5/SELLER/Doc/2021/6/LE/YJ/YJ/1833510/mg-811-carbon-dioxide-sensor-module.pdf>>.

ELHATTAB, K.; ABOUELMEHDI, K.; ELMOUTAOUAKKIL, A. Internet of things (iot) for smart city, agriculture and healthcare. 2022. Disponível em: <<http://www.jatit.org/volumes/Vol100No4/18Vol100No4.pdf>>.

ESPRESSIF, S. *ESP-WIFI-MESH*. 2016. Acesso em 13 de Janeiro de 2024. Disponível em: <<https://www.espressif.com/en/products/sdks/esp-wifi-mesh/overview>>.

ESPRESSIF, S. *ESP32 Series Datasheet*. 2023. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>.

FAROOQ, M. S.; RIAZ, S.; ABID, A.; UMER, T.; ZIKRIA, Y. B. Role of iot technology in agriculture: A systematic literature review. *Electronics*, v. 9, n. 2, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/electronics9020319>>.

FIELDING, R.; GETTYS, J.; MOGUL, J. C.; FRYSTYK, H.; MASINTER, L.; LEACH, P.; BERNERS-LEE, T. *Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1*. [S.l.], 1999. Obsoletes RFC 2068. Disponível em: <<https://www.w3.org/Protocols/HTTP/1.1/rfc2616.pdf>>.

FREITAS, E. C. d.; PRODANOV, C. C. *Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico*. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013. 49–59 p.

GAGLIARDI, G.; LUPIA, M.; CARIO, G.; GACCIO, F. C.; D'ANGELO, V.; COSMA, A. I. M.; CASAVOLA, A. An internet of things solution for smart agriculture. *Agronomy*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 11, p. 2140, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy11112140>>.

GLAROUDIS, D.; IOSSIFIDES, A.; CHATZIMISIOS, P. Survey, comparison and research challenges of iot application protocols for smart farming. *Computer Networks*, Elsevier, v. 167, p. 106978, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107037>>.

GOKHALE, P.; BHAT, O.; BHAT, S. Introduction to iot. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.17148/IARJSET.2018.517>>.

GUIMARÃES, A. M. *Estatística: análise de correlação usando Python e R*. 2021. Disponível em: <<https://medium.com/omixdata/estat%C3%ADstica-an%C3%A1lise-de-correla%C3%A7%C3%A3o-usando-python-e-r-d68611511b5a>>.

HADDI, Z.; MAVRODARIS, A. Recent advances in electronic nose technology for detection of volatile organic compounds. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 188, p. 583–597, 2013. ISSN 0925-4005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.07.120>>.

HAWLA, M.; MUNDRA, A.; RAKESH, N.; AGRAWAL, A.; GHRERA, S. P. Fault tolerance based routing approach for wmn. In: *2015 International Conference on Computer and Computational Sciences (ICCCS)*. [s.n.], 2015. p. 177–182. ISBN 978-1-4799-1818-8. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICCACS.2015.7361345>>.

HEIL, M.; KARBAN, R. Explaining evolution of plant communication by airborne signals. *Trends in Ecology and Evolution*, v. 25, n. 3, p. 137 – 144, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.09.010>>.

HJERTZ, G.; DENTENEER, D.; MAX, S.; TAORI, R.; CARDONA, J.; BERLEMANN, L.; WALKE, B. IEEE 802.11s: The WLAN mesh standard. *IEEE Wireless Communications*, v. 17, n. 1, p. 104–111, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/mwc.2010.5416357>>.

INDUSTRIES, A. *Adafruit Unified Sensor Driver*. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://github.com/adafruit/Adafruit_Sensor>.

JACQUET, P.; MUHLETHALER, P.; CLAUSEN, T.; LAOUITI, A.; QAYYUM, A.; VIENNOT, L. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. In: *Proceedings. IEEE International Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century*. [s.n.], 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/inmic.2001.995315>>.

KARIMI, K.; ATKINSON, G. *Into the Internet of Things: From the Sensor to the Cloud*. 2013. <<https://www.mouser.fr/pdfdocs/INTOTHNGSWP.PDF?origin=new>>. Accessed on 2023-04-13.

KOLBAN, N. *Kolban's Book on ESP8266*. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2016.

KUNDU, P.; DEBDAS, S.; KUNDU, S.; SAHA, A.; MOHANTY, S.; SAMAANTA, S. Cloud monitoring system for agriculture using internet of things. In: *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/iceca49313.2020.9297405>>.

LAKHWANI, K.; GIANEY, H.; AGARWAL, N.; GUPTA, S. Development of IoT for smart agriculture: A review. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-2285-3_50>.

LATHI, B.; PARMA, G. G. *Sinais e Sistemas Lineares*. Traduzido por gustavo guimarães parma. São Paulo: Bookman, 2004. ISBN 0-19-515833-4.

LI, J.; GU, W.; YUAN, H. Research on iot technology applied to intelligent agriculture. In: *International Conference on Computer Science and Application Engineering*. [s.n.], 2016. p. 1191–1194. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48768-6_136>.

LIDIANE, L. M. K.; KUANG, H.; PATRÍCIA, B. C.; MILTON, P. J. *Análise Fatorial por Meio da Matriz de Correlação de Pearson e Policórica no Campo das Cisternas*. 2018. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/5266/4205>>.

LIU, T. *Digital Humidity and Temperature Sensor AM2302*. [S.l.], 2012. Disponível em: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/Digital+humidity+and+temperature+sensor+AM2302.pdf>>.

LOHIYA, R.; THAKKAR, A. Application domains, evaluation data sets, and research challenges of iot: A systematic review. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 78506–78518, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3048439>>.

(MAN), C. de Padrões para Redes Locais (LAN) e R. M. *IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ieeestd.2016.7786995>>.

MARTÍN, G. *painlessMesh*. 2019. <<https://github.com/gmag11/painlessMesh/tree/master>>. Acesso em: 11 de janeiro de 2024.

MAT, I.; KASSIM, M. R. M.; HARUN, A. N.; YUSOFF, I. M. IoT in precision agriculture applications using wireless moisture sensor network. In: *2016 IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*. [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/icos.2016.7881983>>.

MATHIAS, L. Entenda o que é população e amostra da pesquisa de mercado. 2022. Disponível em: <<https://mindminers.com/blog/populacao-e-amostra-pesquisa/>>.

MONTEIRO, C. *Que conhecimentos são necessários para se ensinar a média aritmética?* 2009. Disponível em: <<https://tinyurl.com/34j667h5>>.

MORAIS, C. M. d.; SADOK, D.; KELNER, J. An IoT sensor and scenario survey for data researchers. *Journal of the Brazilian Computer Society*, v. 25, n. 4, p. 1–17, 2019. ISSN 0104-6500. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s13173-019-0085-7>>.

MORETTIN, L. G. *Estatística Básica*. São Paulo: Pearson, 2010. ISBN 978-85-7605-370-5.

Nanjing Top Power ASIC Corp. *TP4056 1A Standalone Linear Li-ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP – 8*. Nanjing: [s.n.], 2015. Datasheet. Disponível em: <<https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>>.

NARESH, M.; MUNASWAMY, P. Smart agriculture system using iot technology. 2019. Disponível em: <http://ieeeprojectsmadurai.com/IEEE%202019%20IOT%20BASEPAPERS/5_IOT%20SMART%20AGRICULTURE.pdf>.

PATEL, K. K.; PATEL, S. M. *IP XI: Internet Protocol version 6*. 2016. <<http://www.opjstamnar.com/download/Worksheet/Day-110/IP-XI.pdf>>. Accessed on 2023-04-13.

PENNINGS, M. *CCS811 Arduino library for the CCS811 digital gas sensor for monitoring indoor air quality from ScioSense*. [S.l.], 2021. Acesso em 2023. Disponível em: <<https://github.com/maarten-pennings/CCS811>>.

PERKINS, C. E.; ROYER, E. M. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In: *Proceedings WMCSA'99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*. [s.n.], 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/mcsa.1999.749281>>.

PIANA, M. C. *A Pesquisa de Campo*. São Paulo: UNESP, 2009.

RIEDLMEIER, M.; GHIRARDO, A.; WENIG, M.; KNAPPE, C.; KOCH, K.; GEORGII, E.; DEY, S.; PARKER, J. E.; SCHNITZLER, J.-P.; VLOT, A. C. Monoterpenes Support Systemic Acquired Resistance within and between Plants. *The Plant Cell*, v. 29, n. 6, p. 1440–1459, 05 2017. ISSN 1040-4651. Disponível em: <<https://doi.org/10.1105/tpc.16.00898>>.

ROCHA, D. Sobre correlações e visualizações de matrizes de correlação no r. 2018. Disponível em: <https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/437792_df39a5ff0a55491fb71f0f4a0f5cd0bf.html>.

Said Mohamed, E.; BELAL, A.; Kotb Abd-Elmabod, S.; EL-SHIRBENY, M. A.; GAD, A.; ZAHRAN, M. B. Smart farming for improving agricultural management. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, v. 24, n. 3, Part 2, p. 971–981, 2021. ISSN 1110-9823. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.08.007>>.

SALAZAR, J.; SILVESTRE, S. *INTERNET OF THINGS*. 2017. <<https://core.ac.uk/download/pdf/132530214.pdf>>.

SALES, F. O.; MARANTE, Y.; VIEIRA, A. B.; SILVA, E. F. Energy consumption evaluation of a routing protocol for low-power and lossy networks in mesh scenarios for precision agriculture. *Sensors*, v. 20, n. 14, p. 3814, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s20143814>>.

SATTLER, M.; COPERINI, E. L. *HTTPClient for Arduino and ESP32*. 2015. <<https://github.com/espressif/arduino-esp32/blob/master/libraries/HTTPClient/src/HTTPClient.h>>. Copyright (c) 2015 Markus Sattler. All rights reserved.

SAXENA, M.; DUTTA, S. Improved the efficiency of IoT in agriculture by introduction optimum energy harvesting in WSN. In: *2020 International Conference on Innovative Trends in Information Technology (ICITIIT)*. [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/icitit49094.2020.907>>.

Sensirion. *Sensirion SHT3x Humidity and Temperature Sensor Datasheet*. 2021. <https://www.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital-971521.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2023.

SENSIRION. *SGP30 Gas Sensor Datasheet*. 2021. <https://www.mouser.com/pdfdocs/Sensirion_Gas_Sensors_SGP30_Datasheet_EN-1148053.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2023.

SENSORTECH, S. *MiCS-6814*. 2015. Disponível em: <https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2015/02/1143_Datasheet-MiCS-6814-rev-8.pdf>.

SILVA, J. A. B. da; PINHEIRO, R. N. *A Análise de Fourier utilizando o software Proteus Isis: Um estudo de caso sobre as harmônicas*. 2012. Disponível em: <<https://tinyurl.com/ycycusyx>>.

SINGH, P. K.; NARESH, R. K.; KUMAR, A.; KUMAR, L.; CHANDRA, M. S.; SHIVANGI. Role of iot technology in agriculture for reshaping the future of farming in india: A review. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1002.052>>.

SINHA, B. B.; DHANALAKSHMI, R. Recent advancements and challenges of internet of things in smart agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.future.2021.08.006>>.

SPARKFUN. *SparkFun TSL2561 Arduino Library*. [S.l.], 2018.

STEVENS, W. R. *The Protocols (TCP/IP Illustrated, Volume 1)*. 1st. ed. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 1993. ISBN 0-201-63346-9.

STEWART, J.; STEWART, R.; KENNEDY, S. Internet of things—propagation modelling for precision agriculture applications. In: *2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*. [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/WTS.2017.7943528>>.

SURESH, M.; PRIYA, D. S. M. Internet of things (iot) in agriculture: an overview of the concepts and challenges in its implementation. 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Suresh-Mylswamy/publication/360777234_Internet_of_Things_IoT_in_Agriculture_an_Overview_of_the_Concepts_and_Challenges_in_its_Implementation/links/628a31568ecbaa07fccbb72f/Internet-of-Things-IoT-in-Agriculture-an-Overview-of-the-Concepts-and-Challenges-in-its-Implementation.pdf>.

SYAFARINDA, Y.; AKHADIN, F.; FITRI, Z. E.; YOGISWARA, W.; ROSDIANA, E. The precision agriculture based on wireless sensor network with mqtt protocol. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 207, p. 012059, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1755-1315/207/1/012059>>.

THOLL, D.; BOLAND, W.; HANSEL, A.; LORETO, F.; RÖSE, U. S. R.; SCHNITZLER, J. P. Practical approaches to plant volatile analysis. *Plant Journal*, v. 45, n. 4, p. 540 – 560, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-3113x.2005.02612.x>>.

TILLAART, R. *SGP30 Arduino library for SGP30 environment sensor*. 2022. Experimental, library is not functional complete yet. Disponível em: <<https://github.com/RobTillaart/SGP30>>.

TORRES, G. *Título do Livro*. 2. ed. Rio de Janeiro: Nova Terra, 2014. ISBN 978-85-61893-28-6.

TUMELERO, N. *Pesquisa Descritiva: Conceito, Características e Aplicação*. 2018. Disponível em: <<https://blog.mettzer.com/pesquisa-descritiva/>>.

TUNGADI, T.; GROEN, S. C.; MURPHY, A. M.; PATE, A. E.; IQBAL, J.; BRUCE, T. J. A.; CUNNIFFE, N. J.; CARR, J. P. Cucumber mosaic virus and its 2b protein alter emission of host volatile organic compounds but not aphid vector settling in tobacco. *Virology Journal*, v. 14, n. 1, p. 91 – 9, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s12985-017-0754-0>>.

V, J. M. N.; R, F. F.; L, Y. M. Q. Design and implementation of WSN and IoT for precision agriculture in tomato crops. In: *2018 IEEE ANDESCON*. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/andescon.2018.8564674>>.

VARMAN, S. A. M.; BASKARAN, A. R.; ARAVINDH, S.; PRABHU, E. Deep learning and IoT for smart agriculture using WSN. In: *2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC)*. [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/iccic.2017.8524140>>.

WENDLING, M. *Sensores*. 2010. Disponível em: <<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>.

WU, D.; QI, T.; LI, W.-X.; TIAN, H.; GAO, H.; WANG, J.; GE, J.; YAO, R.; REN, C.; WANG, X.-B.; LIU, Y.; KANG, L.; DING, S.-W.; XIE, D. Viral effector protein manipulates host hormone signaling to attract insect vectors. *Cell Research*, v. 27, n. 3, p. 402 – 415, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/cr.2017.2>>.

YIN, H.; CAO, Y.; MARELLI, B.; ZENG, X.; MASON, A. J.; CAO, C. Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture. *Advanced Materials*, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/adma.202007764>>.

ZHAO, J.-c.; ZHANG, J.-f.; FENG, Y.; GUO, J.-x. The study and application of the lot technology in agriculture. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICCSIT.2010.5565120>>.

ČOLAKOVIĆ, A.; HADŽIALIĆ, M. Internet of things (iot): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues. *Computer Networks*, v. 144, p. 17–39, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.07.017>>.

ANEXO A – LISTA DE SENSORES DE QUALIDADE DO AR DE BAIXO CUSTO

O presente documento visa apresentar descrição de alguns sensores de qualidade do ar de baixo custo.

A.1 SENSOR MG - 811

(ELECTRONICS, 2020) afirmaram que o Módulo Sensor de Dióxido de Carbono MG-811 costuma ser usado para detectar Dióxido de Carbono (CO₂) com um Sensor de Óxido de Metal, que precisa aquecer a uma temperatura específica com alimentação elétrica. Isso gera vapor de calor e separa o CO₂ do ar em geral.

(ELECTRONICS, 2020) ainda afirmaram que o módulo de sensor possui um MG-811 na placa como componente do sensor. A placa inclui um circuito de condicionamento de sinal que é usado para amplificar o sinal de saída e um circuito de aquecimento para aquecer o sensor. O MG-811 é altamente sensível ao CO₂ e menos sensível ao álcool e monóxido de carbono. o sensor pode ser usado em controle de qualidade do ar, processo de fermentação e monitoramento de qualidade do ar em ambientes internos. A tensão de saída do módulo diminui à medida que a concentração de CO₂ aumenta.

(ELECTRONICS, 2020) realçaram ainda que o sensor MG-811 apresenta faixa de detecção de 350 - 10.000 ppm de CO₂, tempo de resposta menor que um minuto e tensão para aquecimento de 6V.

A.2 SENSOR MICS - 6814

(SENSORTECH, 2015) afirmaram que o MICS - 6814 corresponde a um robusto sensor tipo MEMS capaz de detectar monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio, amônia, etanol, hidrogênio, metano, propano e iso-butano.

(SENSORTECH, 2015) ainda afirmaram que a resistência de detecção em ar R0 é medida sob condições ambientais controladas, ou seja, ar sintético a 23 mais ou menos 5°C e 50 com mais ou menos 10% de umidade relativa para o sensor RED e ar sintético a 23 mais ou menos 5°C e menor ou igual a 5% de umidade relativa para

o sensor. O fator de sensibilidade é definido como R_s no ar dividido por R_s a 60 ppm de CO. As condições de teste são 23 mais ou menos 5°C e 50 com mais ou menos 10% de umidade relativa. Valores indicativos apenas. Teste de amostragem.

(SENSORTECH, 2015) ainda trouxeram que o fator de sensibilidade também é definido como R_s a 0,25 ppm de NO₂, dividido por R_s no ar. As condições de teste são 23 mais ou menos 5°C e menor igual a 5% de umidade relativa. Outro ponto destacado acerca do fator de sensibilidade é o fato de que pode ser definido também como R_s no ar dividido por R_s a 1 ppm de NH₃. As condições de teste são 23 mais ou menos 5°C e 50 com mais ou menos 10% de umidade relativa.

(SENSORTECH, 2015) também informaram que a estrutura do sensor de gás de silício consiste em uma membrana microfabricada com precisão contendo um resistor de aquecimento embutido e a camada de sensoreamento no topo. O MiCS-6814 inclui três chips de sensor com aquecedores e camadas sensíveis independentes. Um chip de sensor detecta gases oxidantes (OX), o outro sensor detecta gases redutores (RED) e o terceiro detecta NH₃. As conexões internas estão mostradas acima.

A.3 SENSOR MQ - 135

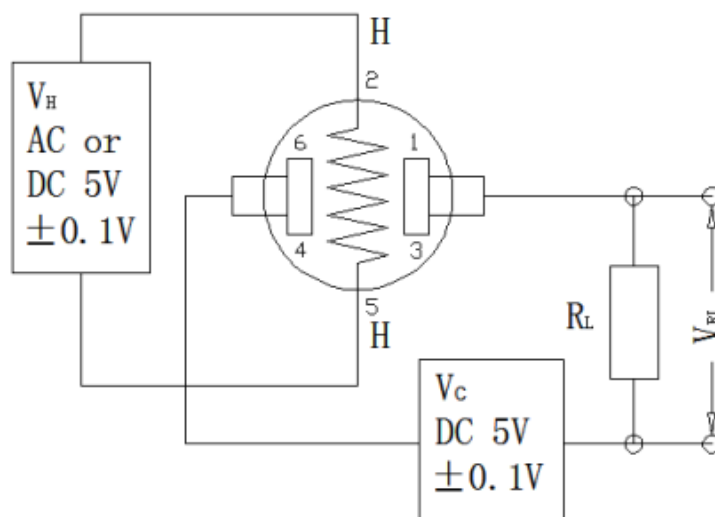
(CO., 2015) informaram que o MQ - 135 é formado por um material sensível chamado de SnO₂, que tem uma condutividade menor quando em contato com o ar. Quando gases poluentes-alvo estão presentes, a condutividade do sensor aumenta com a concentração de gás. Segundo os autores, os usuários podem converter a mudança de condutividade em um sinal de saída correspondente à concentração de gás por meio de um circuito simples.

(CO., 2015) ainda afirmaram que o sensor de gás MQ-135 tem alta sensibilidade a gases de amônia, sulfeto, vapor de benzeno e também pode monitorar bem a fumaça e outros gases tóxicos. É amplamente utilizado em alarmes de gás domésticos, alarmes de gás industriais e detectores de gás portáteis.

(CO., 2015) apresentaram a Figura 64 como circuito básico do sensor MQ - 135. O sensor requer duas entradas de tensão: tensão do aquecedor (VH) e tensão do circuito (VC). VH é usada para fornecer a temperatura de trabalho padrão ao sensor e pode adotar alimentação de corrente contínua (DC) ou corrente alternada (AC), enquanto VRL é a tensão da resistência de carga RL, que está em série com o sensor. VC for-

nece a tensão de detecção para a resistência de carga R_L e deve adotar alimentação de corrente contínua (DC).

Figura 64 – Sensor MQ-135 Circuito básico



Fonte: Própria

A.4 SENSOR CCS 811

O Sensor CCS811 (Figura 65), segundo informou (ALFANO et al., 2020), é um sensor de qualidade do ar que mede a concentração de dióxido de carbono e compostos orgânicos voláteis no ambiente. O sensor utiliza um algoritmo avançado para compensar variações de temperatura e umidade, garantindo alta precisão nas medições. O CCS 811 pode ser utilizado em diversas aplicações, como sistemas de ventilação e ar condicionado, purificadores de ar e monitores de qualidade do ar em ambientes internos. A Tabela 4.1, observada no (AMS, 2018), elenca as especificações técnicas do equipamento.

(AMS, 2018) detalhou ainda que o sensor CCS811 corresponde a um dispositivo de medição de gás altamente preciso, capaz de detectar gases tóxicos e outros compostos orgânicos voláteis (COV). O sensor foi projetado para ser usado em sistemas de monitoramento de qualidade do ar interno, dispositivos vestíveis e outros aplicativos portáteis. O sensor é baseado em tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) e usa um chip sensor avançado para detectar gases em uma faixa de concentração de 0 a 10.000 ppm (partes por milhão).

De acordo com (AMS, 2018), o CCS811 apresenta uma resposta rápida e precisa,

com uma taxa de amostragem de 1 Hz. O sensor possui um algoritmo interno avançado de correção de temperatura e umidade, que ajuda a garantir que as leituras do sensor sejam confiáveis e precisas, mesmo em ambientes extremos. (AMS, 2018) também informou que o CCS 811 é altamente sensível e pode detectar gases em concentrações muito baixas, tornando-o ideal para uso em sistemas de monitoramento de qualidade do ar interno.

O CCS811 é um sensor de baixa potência e usa menos de 1 mA de corrente em operação. O sensor se comunica com o microcontrolador host através de uma interface I2C padrão e possui várias configurações e recursos personalizáveis, como a taxa de amostragem e a resolução do sensor. O sensor também tem um modo de economia de energia para prolongar a vida útil da bateria em dispositivos portáteis.

O sensor CCS811, apresentado na Figura 65 é uma ferramenta valiosa para medir a qualidade do ar interno e detectar a presença de gases tóxicos e COVs. Ele é altamente preciso, sensível e confiável, e é capaz de operar em uma ampla faixa de concentração de gases. O sensor é fácil de usar e configurar, e pode ser integrado em uma variedade de sistemas de monitoramento de qualidade do ar interno, dispositivos vestíveis e outros aplicativos portáteis.

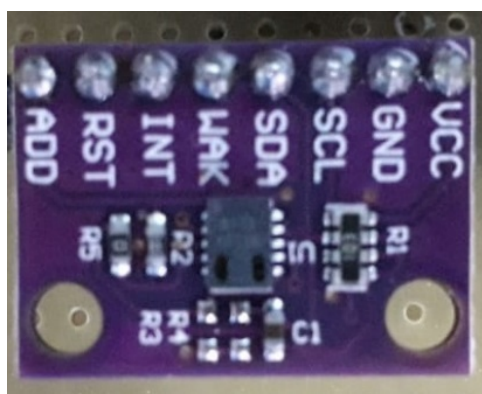


Figura 65 – Sensor CCS 811. Fonte: Própria

Tabela 14 – Especificações do CCS 811

Alimentação	1.8 V a 3.6 V DC
Potência de consumo	60 mW
Temperatura de operação	−5 °C a 50 °C

A.5 SENSOR BME 680

A (BOSCH, 2017) informou que o sensor BME680 (Figura 66) é capaz de mensurar níveis de temperatura e capaz de detectar gases tóxicos, como dióxido de carbono e monóxido de carbono, além de medir a temperatura e umidade do ar. Com a utilização de uma tecnologia de aquecimento integrada, é possível reduzir a influência da umidade ambiente nas medições. O sensor opera com uma ampla faixa de tensão de alimentação, o que o torna compatível com diferentes sistemas embarcados. As informações detalhadas sobre as características elétricas e mecânicas do BME 680 podem ser encontradas no datasheet disponibilizado pela BOSCH.

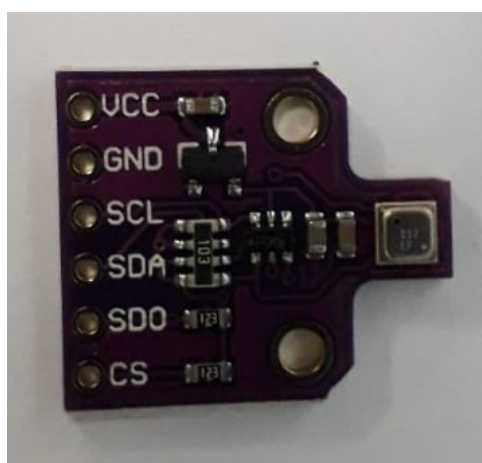


Figura 66 – Sensor BME680. Fonte: Própria.

O BME 680, segundo (BOSCH, 2017), é um sensor de gás integrado de alta precisão fabricado pela Bosch Sensortec. O BME 680 é capaz de medir a qualidade do ar interno e externo, bem como as concentrações de vários gases, incluindo dióxido de carbono, dióxido de nitrogênio, ozônio e outros gases voláteis orgânicos (VOCs). O sensor, segundo afirmou (BOSCH, 2017), é um componente eletrônico avançado que usa uma combinação de tecnologias para obter uma precisão e estabilidade excepcionais.

De acordo com o (BOSCH, 2017), o BME 680 usa uma combinação de sensores de metal-óxido semiconductor (MOX) e de aquecimento de microestrutura integrado (MEMS) para medir as concentrações de gases. Ele também inclui um sensor de temperatura e umidade para fornecer informações adicionais sobre a qualidade do ar. Além disso, o BME 680 tem um baixo consumo de energia e uma ampla faixa de operação, tornando-o adequado para uma variedade de aplicações.

(BOSCH, 2017) realçou ainda que o BME 680 pode ser utilizado em várias aplicações, incluindo sistemas de controle de qualidade do ar interno, sistemas de monitoramento ambiental e dispositivos de medição de qualidade do ar portáteis. Ele também pode ser usado em conjunto com outros sensores, como sensores de partículas e sensores de radiação, para fornecer uma visão mais abrangente da qualidade do ar.

A.6 SENSOR SGP 30

A (SENSIRION, 2021) descreveu o SGP 30 (Figura 67), por meio da junção metal-óxido como sendo um sensor de qualidade do ar interno que mede a concentração de dióxido de carbono (CO₂) e compostos orgânicos voláteis (COV). Ele utiliza uma tecnologia CMOS para detecção de gás e possui um algoritmo de compensação de temperatura e umidade integrado para aumentar a precisão das medições. O sensor é projetado para ser de baixo consumo de energia e tem uma vida útil de até 15 anos. Através da interface I2C, o sensor pode enviar dados de concentração de CO₂ e COV para microcontroladores, microprocessadores e outros dispositivos eletrônicos. Além disso, a instituição ainda afirmou que o sensor foi projetado para fácil integração em processadores embarcados e usado para aplicações IoT.



Figura 67 – Sensor SGP 30. Fonte: Própria

O elemento sensor, segundo informou a (SENSIRION, 2021), apresenta uma robustez inigualável contra gases contaminantes presentes no mundo real aplicações que permitem uma estabilidade única a longo prazo e baixo consumo energético. A Figura 56, retirada do datasheet do SGP 30, representa o diagrama de blocos do sensor.

As recomendações de uso do SGP 30, informadas pela (SENSIRION, 2021), comprovam que o sensor apresenta melhor desempenho quando operado dentro da faixa

normal recomendada de temperatura e umidade de 5 – 55 °C e 4 –20 g/m³ , respectivamente. A exposição prolongada a condições fora da faixa recomendada, especialmente em alta umidade, pode afetar o desempenho do sensor. Exposição prolongada em condições extremas podem diminuir a vida útil do sensor. Além de CO₂ e de tVOC, é possível medir concentrações de H₂ e de Ethanol.

O SGP30, seugndo afirmou (SENSIRION, 2021), utiliza uma tecnologia patenteada de compensação de VOC que garante alta precisão e confiabilidade das medições. Além disso, o sensor possui um tempo de resposta rápido e uma longa vida útil, com uma estabilidade de sinal de longo prazo superior a 10 anos. Essas características fazem do SGP30 uma excelente escolha para aplicações em que é necessário um monitoramento preciso e contínuo da qualidade do ar.

De acordo com (SENSIRION, 2021), o SGP30 pode ser integrado a uma variedade de sistemas de controle, incluindo microcontroladores e sistemas de controle de autônomo. O sensor possui um protocolo de comunicação I2C padrão que facilita sua integração em sistemas eletrônicos. Além disso, o SGP30 é compatível com a maioria dos níveis de tensão, o que torna sua integração mais fácil em uma variedade de sistemas.

O (SENSIRION, 2021) realçou ainda que ao utilizar o sensor SGP30 em projetos, é importante entender as especificações do dispositivo. O (SENSIRION, 2021) forneceu informações detalhadas sobre o funcionamento do sensor, bem como sobre as condições de operação recomendadas, como faixa de temperatura e umidade. Além disso, o datasheet do sensor fornece informações importantes sobre a calibração do dispositivo e sobre como interpretar os dados de saída.

O (SENSIRION, 2021) informou que o sensor utiliza um algoritmo de compensação de linha de base dinâmica e parâmetros de calibração on-chip para fornecer dois sinais de qualidade do ar complementares. Com base nos sinais do sensor, um sinal total de COVs (TVOC) e um sinal equivalente de CO₂ (CO₂eq) são calculados. O processo de medição da qualidade do ar é iniciado com o comando "Init_air_quality". Após esse comando, é necessário enviar o comando "Measure_air_quality" em intervalos regulares de 1 segundo para garantir o correto funcionamento do algoritmo de compensação de linha de base dinâmica.

O sensor responde com 2 bytes de dados (MSB primeiro) e 1 byte de CRC para cada um dos dois sinais pré-processados de qualidade do ar na ordem CO₂eq (ppm)

e TVOC (ppb). Nos primeiros 15 segundos após o comando "Init_air_quality", o sensor está em uma fase de inicialização, durante a qual o comando "Measure_air_quality" retorna valores fixos de 400 ppm de CO₂eq e 0 ppb de TVOC.

O SGP30 também oferece a possibilidade de ler e gravar os valores de linha de base do algoritmo de correção de linha de base. Essa função é usada para salvar a linha de base em intervalos regulares em uma memória externa não volátil e restaurá-la após uma nova inicialização ou redefinição do sensor. O comando "Get_baseline" retorna os valores de linha de base para os dois sinais de qualidade do ar. O sensor responde com 2 bytes de dados (MSB primeiro) e 1 byte de CRC para cada um dos dois valores na ordem CO₂eq e TVOC. Esses dois valores devem ser armazenados em uma memória externa. Após uma inicialização ou redefinição, a linha de base do algoritmo de correção de linha de base pode ser restaurada enviando primeiro um comando "Init_air_quality", seguido de um comando "Set_baseline" com os dois valores de linha de base como parâmetros na ordem (TVOC, CO₂eq).

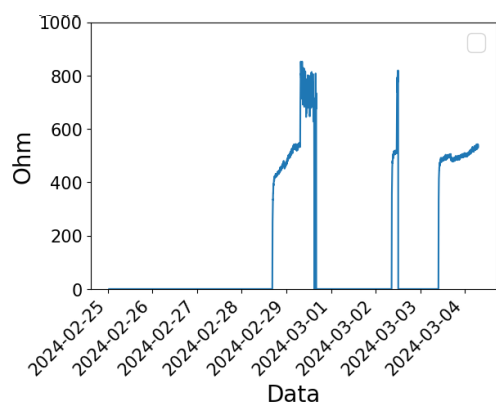
(SENSIRION, 2021) realçou ainda que o sensor possui uma compensação de umidade embutida para os sinais de qualidade do ar (CO₂eq e TVOC) e os sinais brutos do sensor (sinal de H₂ e sinal de etanol). Para usar a compensação de umidade embutida, é necessário fornecer um valor de umidade absoluta de um sensor de umidade externo, como o SHT31. Usando o comando "Set_humidity", um novo valor de umidade pode ser gravado no SGP30, enviando 2 bytes de dados (MSB primeiro) e 1 byte de CRC. Os 2 bytes de dados representam os valores de umidade como um número fixo de 8,8 bits, com um valor mínimo de 0x0001 (= 1/256 g/m³) e um valor máximo de 0xFFFF (255 g/m³ + 255/256 g/m³). Por exemplo, o envio de um valor de 0x0F80 corresponde a um valor de umidade de 15,50 g/m³ (15 g/m³ + 128/256 g/m³).

Após definir um novo valor de umidade, esse valor será usado pelo algoritmo de compensação de umidade embutido até que um novo valor de umidade seja definido usando o comando "Set_humidity". Reiniciar o sensor (ligar ou redefinir) ou enviar um valor de 0x0000 (= 0 g/m³) define o valor de umidade usado para compensação para o seu valor padrão (0x0B92 = 11,57 g/m³) até que um novo valor de umidade seja enviado. Enviar um valor de umidade de 0x0000 pode ser usado para desligar a compensação de umidade.

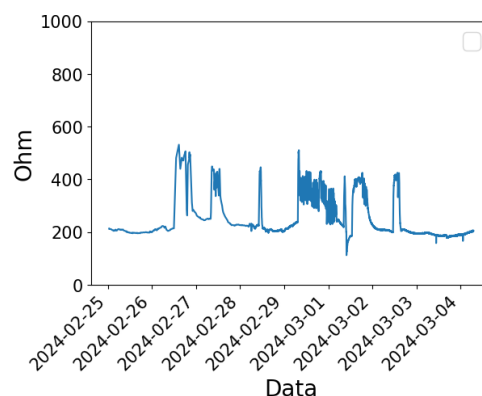
ANEXO B – CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA DO BME680

As medições de resistência pelo sensor de qualidade do ar BME680 estão sujeitas a erros, conforme mostrado na Fig. 68. Embora os valores de resistência relatados pelos BME680 próximos e distantes sejam muito diferentes, os sinais VOC monitorados pelo SGP30 não mostram tal discrepância. Durante o experimento a iluminação foi desligada no dia primeiro de março às 09h00. A descontinuidade observada na Fig. 54 não pôde ser reproduzida dando outra evidência de que os valores de resistência não são muito confiáveis.

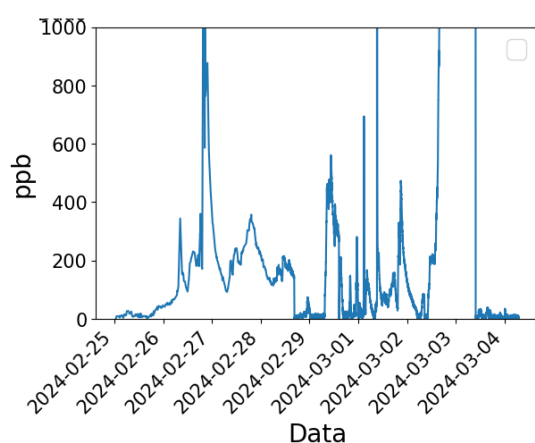
Figura 68 – Séries temporais de resistência (a,b) e COVs (c,d)



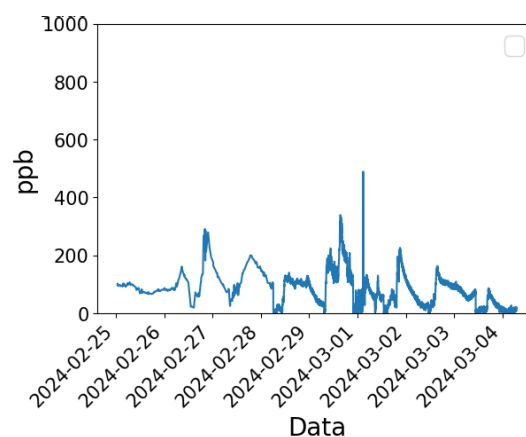
(a) BME680 próximo



(b) BME680 distante



(c) SGP30 próximo



(d) SGP30 distante

Fonte: Própria.

ANEXO C – FUNÇÃO PARA GERAR GRÁFICOS A PARTIR DA FFT

```
def calcular_fft(valores):
    # Colunas a serem consideradas para calcular a FFT
    colunas = ['tempBME', 'humBME', 'pressBME', 'tlsLUX', 'tempSHT31', 'co2SGP', 'sgpTVOC', 'resBME', 'sgpH2',
               'sgpEthanol']

    # Configuração do layout dos subplots
    num_colunas = 1
    num_linhas = len(colunas)
    figsize = (5, 15)

    # Criação dos subplots
    fig, axs = plt.subplots(num_linhas, num_colunas, figsize=figsize, sharex=True)

    for i, coluna in enumerate(colunas):
        # Acesse os dados da coluna
        dados = valores[coluna].values

        # Calcule a FFT dos dados
        fft_dados = np.fft.fft(dados)

        # Calcule as frequências correspondentes aos pontos da FFT
        n = len(dados)

        # Converter os valores da coluna _key para objetos datetime
        valores['_key'] = pd.to_datetime(valores['_key'])

        # Calcular o período
        primeiro_registro = valores['_key'].iloc[0]
        ultimo_registro = valores['_key'].iloc[-1]
        tempo_total = (ultimo_registro - primeiro_registro).total_seconds()
        quantidade_registros = len(valores)
        periodo = tempo_total / quantidade_registros

        frequencias = np.fft.fftfreq(n, d=periodo)

        # Encontre o índice do valor máximo da amplitude na FFT
        indice_frequencia_max = np.argmax(np.abs(fft_dados))

        # Obtenha a frequência fundamental e seu valor
        frequencia_fundamental = frequencias[indice_frequencia_max]
        valor_frequencia_fundamental = np.abs(fft_dados[indice_frequencia_max])

        # Plot do espectro de frequência
        axs[i].plot(frequencias, np.abs(fft_dados))
        axs[i].set_ylabel('Amplitude')
```

```
    axs[i].set_title('Espectro de Frequência - ' + coluna)
    axs[i].axvline(frequencia_fundamental, color='r', linestyle='--', label='Fundamental')
    axs[i].legend()

    # Adiciona o valor da frequência fundamental no gráfico
    axs[i].text(frequencia_fundamental, valor_frequencia_fundamental, f'{frequencia_fundamental:.2f}',
                color='r', ha='center', va='bottom')

axs[-1].set_xlabel('Frequência')
plt.tight_layout()
plt.xlim((0,0.00004))
plt.show()
```

ANEXO D – LEITURA DE DADOS DE ETHANOL DO SGP30

```
#include "SGP30.h"

SGP30 SGP;
uint8_t count = 0;
uint32_t lastTime = 0;

float avgEth;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial) {
    delay(1);
    yield();
  };

  Serial.print(__FILE__);
  Serial.println(SGP30_LIB_VERSION);
  Serial.println();

  Serial.print("BEGIN:\t");
  Serial.println(SGP.begin());
  Serial.print("TEST:\t");
  Serial.println(SGP.measureTest());
}

void loop()
{
  if (SGP.readRaw())
  {
    if (count == 0)
    {
      Serial.println("\nH2_raw \tEth_raw\tEthanol_ppm");
      count = 10;
    }

    avgEth = avgEth + 0.1 * (SGP.getEthanol_raw() - avgEth);

    Serial.print(SGP.getH2_raw());
    Serial.print("\t");
    Serial.print(SGP.getEthanol_raw());
    Serial.print("\t");
  }
}
```

```
    Serial.println();

    count--;
}

if (millis() - lastTime >= 50)
{
    lastTime = millis();
    SGP.requestRaw();
}
}
```

ANEXO E – FUNÇÃO PARA COLETAR DADOS E ARMAZENAR NO GOOGLE SHEETS

```
function doGet(e) {
  Logger.log( JSON.stringify(e) ); // view parameters
  var result = 'Ok'; // assume success
  if (e.parameter == 'undefined') {
    result = 'No Parameters';
  }
  else {
    var sheet_id = 'SEU CHIP ID AQUI'; // Spreadsheet ID
    var sheet = SpreadsheetApp.openById(sheet_id).getActiveSheet(); // get Active sheet
    var newRow = sheet.getLastRow() + 1;
    var rowData = [];
    d = new Date();
    rowData[0] = d; // Timestamp in column A
    rowData[1] = d.toLocaleTimeString(); // Timestamp in column A

    // Colunas a serem consideradas para coleta de dados
    var columns = [
      'tempBME', 'humBME', 'pressBME', 'tlsLUX', 'tempSHT31',
      'co2SGP', 'sgpTVOC', 'resBME', 'sgpH2', 'sgpEthanol', 'macAddress'
    ];

    for (var i = 0; i < columns.length; i++) {
      var column = columns[i];
      var value = e.parameter[column];

      if (value !== undefined) {
        rowData.push(value);
        result += ' Written on column ' + String.fromCharCode(65 + i);
      }
    }

    Logger.log(JSON.stringify(rowData));

    // Write new row below
    var newRange = sheet.getRange(newRow, 1, 1, rowData.length);
    newRange.setValues([rowData]);
  }

  // Return result of operation
  return ContentService.createTextOutput(result);
}

function stripQuotes( value ) {
```

```
return value.replace(/^[\'"]|['"]$/g, "");  
}
```

ANEXO F – FUNÇÃO PARA RECORTAR E BAIXAR DATAFRAME

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""Corretor_dataframe_mestrado.ipynb

Automatically generated by Colaboratory.

Original file is located at
    https://colab.research.google.com/drive/1Rn9-AMVpU04fKYiekKLJdai5vi_MGY65
"""

import pandas as pd

# Carregar o arquivo CSV
df = pd.read_csv('/content/dadosMeshLongePlantaSemMac (3).csv')

# Criar a nova coluna "_key" no formato desejado
df['_key'] = pd.to_datetime(df['data'] + ' ' + df['hora']).dt.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')

df.head()

df.tail()

"""#Função para cortar o dataframe na posição que eu desejo"""

def recortar_dataframe(df, timestamp1, timestamp2):
    # Converter a coluna 'data' para o tipo datetime
    df['data'] = pd.to_datetime(df['data'], dayfirst=True)

    # Converter a coluna 'hora' para o tipo datetime
    df['hora'] = pd.to_datetime(df['hora'], format='%H:%M:%S').dt.time

    # Converter os timestamps para o tipo datetime
    timestamp1 = pd.to_datetime(timestamp1, format='%Y-%m-%d %H:%M:%S')
    timestamp2 = pd.to_datetime(timestamp2, format='%Y-%m-%d %H:%M:%S')

    # Criar uma coluna combinando data e hora
    df['data_hora'] = df['data'] + pd.to_timedelta(df['hora'].astype(str))

    # Filtrar o dataframe com base nos timestamps fornecidos
    novo_df = df.loc[(df['data_hora'] >= timestamp1) & (df['data_hora'] <= timestamp2)].copy()

    # Ajustar o formato da coluna '_key' para 'yyyy-mm-dd hh:mm:ss'
    # Criar a nova coluna "_key" no formato desejado
    novo_df['_key'] = pd.to_datetime(df['data'].astype(str) + ' '
                                     + df['hora'].astype(str)).dt.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
```

```
# Remover a coluna de data/hora temporária
novo_df.drop('data_hora', axis=1, inplace=True)

# Baixar o DataFrame resultante em um arquivo CSV
novo_df.to_csv('dados.csv', index=False)

return novo_df

# Chamar a função recortar_e_baixar_dataframe
df_novo = recortar_dataframe(df, '2023-10-22 00:00:00', '2023-11-21 17:20:00')

df_novo.head()

df_novo.tail(1)

df_novo.columns[12]

df_novo.drop(df.columns[12], axis=1)

from google.colab import files
files.download('dados.csv')
```

ANEXO G – FUNÇÃO PARA AVALIAR ESTATISTICAMENTE

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""Análise_estatística_dos_dados_com_planta (1).ipynb

Automatically generated by Colaboratory.

Original file is located at
    https://colab.research.google.com/drive/1ywPTKX0ti2Rm6D6TUHW0ZleyRekmMKap

# ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS COM PLANTA

15/06 a 20/06

## Importação das libs
"""

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import skew
from scipy.stats import shapiro
from scipy.stats import binom
import numpy as np
from scipy.stats import anderson
from scipy.stats import chi2_contingency
import plotly.express as px

"""## Importação da base de dados"""

data = pd.read_csv('/content/dadosComPlantaComLuz.csv')

"""## Exploração inicial dos dados"""

# Inicializando a variável avgEth com 0
avgEth = 0.0

# Aplicando a fórmula para cada linha e criando a nova coluna 'sgpEthanolPPM'
data['sgpEthanolPPM'] = 0 # Inicializando a coluna com valores 0

for index, row in data.iterrows():
    avgEth = avgEth + 0.1 * (row['sgpEthanol'] - avgEth)
    data.at[index, 'sgpEthanolPPM'] = avgEth / 1000

data.head()

data.describe()
```

```
data.tail()

# Verificar valores ausentes
valores_ausentes = data.isnull().sum()

print(valores_ausentes)

"""# Análise exploratória dos dados

## Avaliando dados estatísticos descritivos
"""

data.describe()
```

```
print("\n\n###Moda###\n\n", data.mode())

def avaliarDist(dado):
    # Criar histograma
    dado.hist()

    # Configurar título e rótulos dos eixos
    plt.title('Histograma')
    plt.xlabel('Valores')
    plt.ylabel('Frequência')

    # Exibir o histograma
    plt.show()

    # Criar gráfico de densidade
    dado.plot.density()

    # Configurar título e rótulos dos eixos
    plt.title('Gráfico de Densidade')
    plt.xlabel('Valores')
    plt.ylabel('Densidade')

    # Exibir o gráfico de densidade
    plt.show()

    # Criar gráfico de caixa
    dado.plot.box()

    # Configurar título e rótulo do eixo
    plt.title('Gráfico de Caixa')
    plt.ylabel('Valores')
```

```
# Exibir o gráfico de caixa
plt.show()

def calcular_coeficiente_assimetria(dado):

    # Calculando o coeficiente de assimetria amostral
    coefficient = skew(dado)

    print("Coeficiente de Assimetria Amostral:", coefficient)

    if coefficient > 0:
        print("Assimetria postivia")
    elif coefficient < 0:
        print("Assimetria negativa")

def teste_shapiro_wilk(dado):

    # Teste de Shapiro-Wilk
    _, p_value = shapiro(dado)

    if p_value < 0.05:
        print("A distribuição NÃO é normal.")
    else:
        print("A distribuição é normal.")

def teste_is_binomial(dado):

    # Estatísticas dos dados observados
    mean_observed = np.mean(dado)
    var_observed = np.var(dado)

    # Parâmetros esperados para uma distribuição binomial
    n_expected = mean_observed**2 / (mean_observed - var_observed)
    p_expected = 1 - var_observed / mean_observed

    # Comparação dos parâmetros estimados com os valores esperados
    if n_expected.is_integer() and 0 <= p_expected <= 1:
        print("A distribuição é binomial.")
    else:
        print("A distribuição NÃO é binomial.")

def teste_anderson_darling(dados):

    # Realiza o teste de Anderson-Darling para diferentes distribuições
    resultado = anderson(dados)

    # Extrai os valores críticos e as estatísticas de teste do resultado
    estatistica, valores_criticos, nivel_significancia = resultado.statistic, resultado.critical_values,
    resultado.significance_level
```

```

# Imprime os resultados para cada distribuição testada
print("Teste de Anderson-Darling:")
print("-----")
print("Distribuição\t\tEstatística\tValor Crítico")
print("-----")
for valor_critico in valores_criticos:
    print(f"Normal\t\t\t{estatistica:.4f}\t\t\t{valor_critico:.2f}")
print("-----")

# Verifica se a estatística de teste é menor do que o valor crítico para a distribuição normal
if estatistica < valores_criticos[2]:
    print("A distribuição dos dados parece se ajustar a uma distribuição normal.")
else:
    print("A distribuição dos dados não se ajusta bem a uma distribuição normal.")

def executar_testes_distribuicao(dados):
    print("Anderson - Darling")
    teste_anderson_darling(dados)
    print("Teste para averiguar se é binomial")
    teste_is_binomial(dados)
    print("Teste de Shapiro-Wilk")
    teste_shapiro_wilk(dados)

```

```

"""1. SGP 30 CO2

avaliarDist(data['co2SGP'])

"""0 coeficiente de assimetria indica que há uma forte assimetria positiva dos dados."""

calcular_coeficiente_assimetria(data['co2SGP'])

"""Para verificarmos o tipo de distribuição, vamos realizar o teste de Shapiro-Wilk,
Anderson Darling e verificar se é Binomial"""

executar_testes_distribuicao(data['co2SGP'])

"""2. Humidity BME
"""

avaliarDist(data['humBME'])

calcular_coeficiente_assimetria(data['humBME'])

executar_testes_distribuicao(data['humBME'])

```

```
"""3. Pressão BME
"""

avaliarDist(data['pressBME'])

calcular_coeficiente_assimetria(data['pressBME'])

executar_testes_distribuicao(data['pressBME'])

"""4. Resistência do BME 680
"""

avaliarDist(data['resBME'])

calcular_coeficiente_assimetria(data['resBME'])

executar_testes_distribuicao(data['resBME'])

"""5. Dados de Ethanol
"""

avaliarDist(data['sgpEthanol'])

calcular_coeficiente_assimetria(data['sgpEthanol'])

executar_testes_distribuicao(data['sgpEthanol'])

"""6. Dados de SGP 30 h2
"""

avaliarDist(data['sgpH2'])

calcular_coeficiente_assimetria(data['sgpH2'])

executar_testes_distribuicao(data['sgpH2'])

"""7. Dados de SGP30 tVOC
"""

avaliarDist(data['sgpTVOC'])

calcular_coeficiente_assimetria(data['sgpTVOC'])

executar_testes_distribuicao(data['sgpTVOC'])

"""8. Dados de Temperatura BME 680
```

```

"""

avaliarDist(data['tempBME'])

calcular_coeficiente_assimetria(data['tempBME'])

executar_testes_distribuicao(data['tempBME'])

```

```

"""9. Temperatura do SHT31
"""

avaliarDist(data['tempSHT31'])

calcular_coeficiente_assimetria(data['tempSHT31'])

executar_testes_distribuicao(data['tempSHT31'])

"""10. Dados de Lux
"""

avaliarDist(data['tlsLUX'])

print(data['tlsLUX'])

calcular_coeficiente_assimetria(data['tlsLUX'])

executar_testes_distribuicao(data['tlsLUX'])

"""## Avaliando a relação entre os dados
"""

# Matriz de Correlação
correlation_matrix = data.corr()
plt.figure(figsize=(10, 4))
plt.imshow(correlation_matrix, cmap='coolwarm', interpolation='nearest', vmin=-1, vmax=1)
plt.colorbar()
plt.xticks(range(len(correlation_matrix)), correlation_matrix.columns, rotation=90)
plt.yticks(range(len(correlation_matrix)), correlation_matrix.columns)
plt.title('Matriz de Correlação')
plt.show()

"""## Avaliando os dados ao longo do tempo"""

import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
import pandas as pd

```

```

# Supondo que 'data' seja o DataFrame contendo os dados e '_key' seja a coluna de datas
data['_key'] = pd.to_datetime(data['_key'])

# Definir os dias que você deseja exibir no gráfico
dias_para_exibir = pd.date_range(start=data['_key'].min(), end=data['_key'].max(), freq='D')

def gerar_grafico_linha(titulo, dado, unidade, nome):
    print("Gráfico de linha de ", dado)
    ax = data.plot(x='_key', y=dado, kind='line')
    plt.xlabel('Data')
    plt.ylabel(unidade)
    plt.title(titulo)

    # Configurar os rótulos do eixo x para exibir os dias desejados
    ax.set_xticks(dias_para_exibir)
    ax.xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%d-%m-%Y'))

    plt.xticks(rotation=45) # Girar os rótulos do eixo x em 45 graus
    plt.legend(labels=[]) # Não criar a legenda
    nome = nome + '_ComPlanta_ComLuz.png'
    # Salvar o gráfico na pasta de downloads
    plt.savefig(nome)
    plt.show()

# Exemplo de utilização:
# Supondo que 'data' seja o DataFrame contendo os dados
# gerar_grafico_linha('Dados de CO2 do SGP30 no cenário com luz e presença da Arruda', 'co2SGP', 'ppm',
#                     'sgpCO2', data)

def gerar_grafico_linha(titulo, dado, unidade, nome):
    print("Gráfico de linha de ", dado)
    ax = data.plot(x='_key', y=dado, kind='line')
    plt.xlabel('Data')
    plt.ylim(14, 22)
    plt.ylabel(unidade)
    plt.title(titulo)
    plt.xticks(rotation=45) # Girar os rótulos do eixo x em 45 graus
    #plt.ylim(0, 100) # Definindo limites para o eixo y
    plt.legend(labels=[]) # Não cria a legenda
    nome = nome + '_ComPlanta_ComLuz.png'
    # Salva o gráfico na pasta de downloads
    plt.savefig(nome)
    plt.show()

# gerar_grafico_linha('co2SGP', 'ppm')

```

```

gerar_grafico_linha('Dados de CO2 do SGP30 no cenário com luz e presença da Arruda' , 'co2SGP', 'ppm',
                    'sgpCO2')

# gerar_grafico_linha('sgpTVOC', 'ppm')
gerar_grafico_linha('Dados de tVOC do SGP30 no cenário com luz e presença da Arruda' , 'sgpTVOC', 'ppb',
                    'sgpTVOC')

#gerar_grafico_linha('humBME', '%')
gerar_grafico_linha('Dados de Umidade do BME680 no cenário com luz e presença da Arruda' , 'humBME', '%',
                    'bme680Umidade')

# gerar_grafico_linha('pressBME', 'hPa')
gerar_grafico_linha('Dados de Pressão do BME680 no cenário com luz e presença da Arruda' , 'pressBME',
                    'hPa', 'bme680Press')

# Exemplo de uso:
gerar_grafico_linha('Dados de Resistência do BME680 no cenário com luz e presença da Arruda' , 'resBME',
                    'Ohm', 'bme680Res')

# gerar_grafico_linha('sgpEthanol', 'ppm')
gerar_grafico_linha('Dados de Ethanol do SGP30 no cenário com luz e presença da Arruda' , 'sgpEthanolPPM',
                    'ppm', 'sgpEthanolPPM')

# gerar_grafico_linha('sgpEthanol', 'ppm')
gerar_grafico_linha('Dados de Eth do SGP30 com luz e presença da Arruda' , 'sgpEthanol',
                    'Valores Brutos de Leitura', 'sgpEthanol')

# gerar_grafico_linha('sgpH2', 'ppm')
gerar_grafico_linha('Dados de H2 do SGP30 no cenário com luz e presença da Arruda' , 'sgpH2', 'ppm', 'sgpH2')

# gerar_grafico_linha('tempBME', '*C')
gerar_grafico_linha('Dados de Temperatura do BME680 no cenário com luz e presença da Arruda' , 'tempBME', '*C',
                    'bme680Temp')

# gerar_grafico_linha('tempSHT31', '*C')
gerar_grafico_linha('Dados de Temperatura do SHT31 no cenário com luz e com a Arruda' , 'tempSHT31', '*C',
                    'sht31')

# gerar_grafico_linha('tlsLUX', 'Lux')
gerar_grafico_linha('Dados de Lux do TSL2561 no cenário com luz e presença da Arruda' , 'tlsLUX', 'Lux',
                    'tsl2561')

"""# Solicitações do professor Stefan

## Plot(Y = SGP30 CO2, X = BME 680 Resistance, Color = Temperature BME 680)
"""

```

```

grafico = px.scatter_matrix(data, dimensions=[
    'resBME',
    'co2SGP',
    ], color = 'tempBME')
grafico.show()

"""## Plot(Y = BME 680 Resistance, X = Temperature BME 680, Color = SGP30 tVOC)

"""

grafico = px.scatter_matrix(data, dimensions=[
    'tempBME',
    'resBME',
    ], color = 'sgpTVOC')
grafico.show()

"""## Plot(Y = BME 680 Resistance, X = Humidity BME 680, Color = SGP30 tVOC)"""

grafico = px.scatter_matrix(data, dimensions=[
    'humBME',
    'resBME',
    ], color = 'sgpTVOC')
grafico.show()

"""## Plot(Y = SGP30 tVOC, X = CO2 BME 680, Color = Ethanol Resistance)"""

grafico = px.scatter_matrix(data, dimensions=[
    'sgpTVOC',
    'co2SGP',
    ], color = 'sgpEthanol')
grafico.show()

"""## Plot(Y = SGP30 tVOC, X = CO2 BME 680, Color = H2 Resistance)"""

grafico = px.scatter_matrix(data, dimensions=[
    'sgpTVOC',
    'co2SGP',
    ], color = 'sgpH2')
grafico.show()

"""## Plot(Y = H2 Resistance, X = Ethanol Resistance, Color = BME Temperature)"""

grafico = px.scatter_matrix(data, dimensions=[
    'sgpEthanol',
    'sgpH2',
    ], color = 'tempBME')

```

```
grafico.show()
```

```
"""## FFT
"""

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def calcular_fft(valores, coluna):
    # Acesse os dados da coluna
    dados = valores[coluna].values

    # Calcule a FFT dos dados
    fft_dados = np.fft.fft(dados)

    # Calcule as frequências correspondentes aos pontos da FFT
    n = len(dados)

    # Converter os valores da coluna _key para objetos datetime
    valores['_key'] = pd.to_datetime(valores['_key'])

    # Calcular o período
    primeiro_registro = valores['_key'].iloc[0]
    ultimo_registro = valores['_key'].iloc[-1]
    tempo_total = (ultimo_registro - primeiro_registro).total_seconds()
    quantidade_registros = len(valores)
    periodo = tempo_total / quantidade_registros

    frequencias = np.fft.fftfreq(n, d=periodo)

    # Encontrar os índices dos picos na FFT
    picos = np.abs(fft_dados)[:n // 2] # Apenas metade do espectro (parte positiva)
    indices_picos = np.argsort(picos)[::-1][:5] # Índices dos 5 maiores picos

    # Ordenar os índices dos picos pelas frequências correspondentes
    indices_picos_ordenados = sorted(indices_picos, key=lambda idx: frequencias[idx])

    # Imprimir informações sobre a largura de banda, componente DC e picos
    print(f'Picos e Valores:')
    for idx in indices_picos_ordenados:
        freq = frequencias[idx]
        valor_pico = np.abs(fft_dados[idx])
        hora = 0
```

```

    if(freq != 0):
        hora = 1/(3600*freq)
        print(f'Frequência: {freq:.6f}, Horas: {hora}, Valor: {valor_pico:.6f}')

# Plot do espectro de frequência como um gráfico de dispersão
plt.scatter(frequencias, np.abs(fft_dados), color='blue')

# Linhas verticais conectando os picos ao eixo x (apenas para os pontos azuis)
plt.vlines(frequencias, 0, np.abs(fft_dados), color='blue')

plt.ylabel('Amplitude')
plt.title('Espectro de Frequência - ' + coluna)
plt.xlabel('Frequência')
plt.xlim((0, 0.00006))
plt.ylim(0, 0.5e7) # Definindo o fundo de escala para 1x10^6 em todos os gráficos

# Adicionar marcadores para os picos em azul
for idx in indices_picos_ordenados:
    freq = frequencias[idx]
    valor_pico = np.abs(fft_dados[idx])
    plt.scatter(freq, valor_pico, color='red', marker='o') # Marcador azul para os picos

# Linhas verticais conectando os picos ao eixo x (apenas para os pontos azuis)
plt.vlines(freq, 0, valor_pico, color='blue')

plt.show()

calcular_fft(data, 'sgpTVOC')

calcular_fft(data, 'tlsLUX')

calcular_fft(data, 'tempBME')
calcular_fft(data, 'humBME')
calcular_fft(data, 'pressBME')
calcular_fft(data, 'tlsLUX')
calcular_fft(data, 'tempSHT31')
calcular_fft(data, 'co2SGP')
calcular_fft(data, 'sgpTVOC')
calcular_fft(data, 'resBME')
calcular_fft(data, 'sgpH2')
calcular_fft(data, 'sgpEthanol')

```