

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE KLESSE PASIANOTTO

NORTON TESSAROLI DEZONET

**DESENVOLVIMENTO DE UM NARIZ ELETRÔNICO COM AMOSTRAGEM A
VÁCUO APLICADO A COMPOSTOS VOLÁTEIS**

PONTA GROSSA

2024

**HENRIQUE KLESSE PASIANOTTO
NORTON TESSAROLI DEZONET**

**DESENVOLVIMENTO DE UM NARIZ ELETRÔNICO COM AMOSTRAGEM A
VÁCUO APLICADO A COMPOSTOS VOLÁTEIS**

**Development of an Electronic Nose with Vacuum Sampling Applied to
Volatile Compounds**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Luiz Stevan Junior

**PONTA GROSSA
2024**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**HENRIQUE KLESSE PASIANOTTO
NORTON TESSAROLI DEZONET**

**DESENVOLVIMENTO DE UM NARIZ ELETRÔNICO COM AMOSTRAGEM A
VÁCUO APLICADO A COMPOSTOS VOLÁTEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Data de aprovação: 12/agosto/2024

Sérgio Luiz Stevan Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Mauricio Dos Santos Kaster
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Josmar Ivanqui
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**PONTA GROSSA
2024**

O insucesso é apenas uma oportunidade para
recomeçar com mais inteligência. (FORD;
CROWTHER; COLLECTION, 1922)

RESUMO

Narizes eletrônicos são dispositivos compostos por uma matriz de sensores de gás, com o objetivo de capturar sinais elétricos oriundos de diferentes concentrações de compostos voláteis (CVs) no ar e posteriormente processá-los com a intenção de identificar ou classificar compostos. Nesta perspectiva, este trabalho tem como propósito o desenvolvimento de um protótipo, partindo de uma versão anterior, visando expansão dos sensores empregados, maior estabilidade eletromecânica, facilidade de operação e uma perspectiva de coletas empregando técnicas de amostragem mediante variação de pressão. Desenvolveu-se um protótipo utilizando 18 sensores com especificações variadas, para que uma maior gama de aplicações pudessem ser verificadas posteriormente, além de uma interface de configuração e obtenção de dados sem fio, com etapas de coleta automatizadas por uma bomba a vácuo e válvulas eletromecânicas. A validação do protótipo foi realizada através da parametrização do seu projeto eletrônico, incluindo testes de sincronismo e faixa de operação dos componentes, posteriormente realizaram-se coletas de dados com amostras de álcool etílico em concentrações variadas. Projetos futuros incluem melhorias nos materiais de vedação, bem como análises de resposta em função da pressão e classificação das amostras.

Palavras-chave: nariz eletrônico; processamento de dados; sensores de gás; classificação de compostos voláteis; interface homem-máquina.

ABSTRACT

Electronic noses are devices composed of a gas sensor array, aiming to acquire electrical signals from different concentrations of volatile compounds (VCs) in air, and later process these signals, aiming to identify or classify these compounds. In this manner, this work aims to develop a prototype based on a previous version, aiming to expand the employed sensors, better electromechanical stability, ease-of-use and a perspective of data acquisition through sampling by pressure change. A prototype comprised of 18 sensors with a wide variety of specifications was developed, so that a higher applications range could be verified later, besides that, an interface for wireless setup and data acquisition, with data collection steps automated by a vacuum pump and electromechanical valves. The prototype's validation was done by benchmarking its auxiliary circuitry, including synchronism and operation range tests, followed by sampling ethyl alcohol in varied concentrations. Future projects include the improvement on the sealing materials, as well as the analysis of response as function of pressure and classification of samples.

Keywords: electronic nose; data processing; gas sensors; classification of volatile compounds; human-machine interface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sensores do tipo MOX em ar comum, gases oxidantes e gases redutores	18
Figura 2 – Circuito <i>Pull Down</i>	18
Figura 3 – Circuito <i>Pull Up</i>	19
Figura 4 – Módulo do sensor MQ-X	19
Figura 5 – Exemplo de sensor da série MQ-x	20
Figura 6 – Sensor TGS822 e exemplo da série TGS26xx	20
Figura 7 – Módulo MiCS-6814	20
Figura 8 – <i>Pinout</i> do ESP32-DevKit-V1, plataforma DOIT	22
Figura 9 – Diagrama de blocos do ESP32-DevKit-V1, plataforma DOIT	23
Figura 10 – Ruído no ADC do ESP32	24
Figura 11 – Implementação ADS1115	24
Figura 12 – Diagrama Geral do Protótipo	31
Figura 13 – Diagrama Eletrônico	33
Figura 14 – Comando do Relé	34
Figura 15 – Comando das válvulas e bomba	35
Figura 16 – Validação do ADS1115	36
Figura 17 – Captura da tela do osciloscópio	37
Figura 18 – Hierarquia das páginas da IHM	37
Figura 19 – Diagrama das <i>tasks</i>	38
Figura 20 – Diagrama de Setup e Loop	39
Figura 21 – Diagrama da IHM - Parte 1	41
Figura 22 – Diagrama da IHM - Parte 2	42
Figura 23 – Diagrama da máquina de estados - Função <i>Refresh</i>	43
Figura 24 – Diagrama da máquina de estados - Função <i>Check</i>	44
Figura 25 – Diagrama da leitura dos sensores Parte 1	48
Figura 26 – Diagrama da leitura dos sensores Parte 2	49
Figura 27 – Visualização do arquivo bruto dos dados coletados	50
Figura 28 – Protótipo completo explicado - Vista superior	51
Figura 29 – Placa de comando explicada - Vista superior	52
Figura 30 – Placa de sensores explicada - Vista superior	52

Figura 31 – Placa de comando - Vista em perspectiva	53
Figura 32 – Placa de sensores - Vista em perspectiva	53
Figura 33 – Acesso à rede AP do ESP32	54
Figura 34 – Página principal da interface	55
Figura 35 – Páginas Monitoramento e Gráfico	56
Figura 36 – <i>Plotter</i> desenvolvido	56
Figura 37 – Exemplo de uso do <i>plotter</i>	57
Figura 38 – Páginas Controle e ação do botão Iniciar	58
Figura 39 – Página de dados	59
Figura 40 – Página de Downloads	59
Figura 41 – Análise da coleta a vazio	60
Figura 42 – Etanol - 80% de concentração	61
Figura 43 – Etanol - 60% de concentração	62
Figura 44 – Etanol - 40% de concentração	62
Figura 45 – Etanol - 20% de concentração	63
Figura 46 – Circuitos de Comando - PCI de Processamento	72
Figura 47 – Pinouts - PCI de Processamento	73
Figura 48 – Circuitos de aquisição - PCI Sensores	74
Figura 49 – Circuitos sensores de gases - PCI Sensores	75
Figura 50 – PCI Sensores	76
Figura 51 – PCI Processamento	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre estudos sobre narizes eletrônicos	16
Quadro 2 – Comparação dos sensores de gás	17
Quadro 3 – Plataformas de prototipagem	21
Quadro 4 – Características dos Sensores de Gás Utilizados	28
Quadro 5 – Placa de Sensores - Componentes Adicionais	29
Quadro 6 – Placa de Controle	29
Quadro 7 – Aparato Físico e Experimental	29
Quadro 8 – Valores comerciais de R_L	33
Quadro 9 – Diluição das amostras	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ADC	Analog-to-Digital Converter
AD	Analógico-Digital
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
CVs	Compostos Voláteis
HS-SPME/GC-MS	Micro extração em Fase Sólida com Cromatografia Gasosa e Espectrometria de Massas
I2C	Inter-Integrated Circuit
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MOX	Metal-Oxide
MOS	Metal-Óxido-Semicondutor
MUX	Multiplexador
PCA	Análise de Componentes Principais
PCC	Coeficiente de Correlação de Pearson
PCIs	Placas de Circuitos Impressos
QCM	<i>Quartz Crystal Microbalance</i>
ROIC	<i>Read-Out Integrated Circuit</i>
HMF	<i>Hydroxymethylfurfural</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo geral	11
1.1.2	Objetivos específicos	12
1.2	Justificativa	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Estado da arte	14
2.2	Sensores de gás	17
2.2.1	Sensores de Óxido Metálico (MOX)	17
2.3	Microcontrolador	21
2.3.1	ESP32	21
2.4	Conversores Analógicos Digitais	22
2.5	Multiplexadores	24
2.6	Circuitos de acionamento	25
2.6.1	Transistores	25
2.6.2	Par Darlington	25
2.6.3	Relés	26
2.7	Interface Homem Máquina	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Materiais	28
3.2	Métodos	30
3.2.1	Concepção do protótipo	30
3.2.2	Projeto eletrônico e aparato físico	31
3.2.2.1	<u>Validação do ADS1115</u>	35
3.2.3	IHM	36
3.2.3.1	<u>Tasks programadas</u>	37
3.2.3.2	<u>Construção da IHM</u>	38
3.2.3.3	<u>Diagramas da IHM</u>	40
3.2.4	Aquisição de Dados	45
3.2.4.1	<u>Dados</u>	45

3.2.5	Metodologia de coleta	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Protótipo	51
4.2	IHM	51
4.3	Resultados das coletas	60
4.3.1	Coleta a vazío	60
4.3.2	Álcool etílico	60
4.4	Discussão geral	63
4.5	Limitações e trabalhos futuros	64
5	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICE A ESQUEMÁTICOS ELETRÔNICOS E DESENHOS DE PCIS	72

1 INTRODUÇÃO

Apesar dos recentes avanços na capacidade de estudo genômicos, as técnicas e sistemas empregados para coleta e análise de amostras ainda é precária em diversos países (WHO, 2023). Trabalhos como o de Ghazaly *et al.* (2023) analisam o desempenho de métodos não invasivos para determinação de bioindicadores específicos a COVID-19, discutindo a viabilidade do uso de *e-noses*, através da amostragem da respiração exalada.

A crescente demanda pelo aumento de eficiência nos métodos de produção agrícola requer o desenvolvimento de novas técnicas para acelerar todos os processos da cadeia produtiva, cita-se a determinação do ponto ótimo para colheita e classificação dos produtos como uma das principais demandas. O trabalho de Voss (2019) discorre sobre o desenvolvimento de um nariz eletrônico e técnicas de processamento de dados para classificação da maturação de pêssegos *in loco*.

Além das perspectivas de aplicação agrícola e no ramo da engenharia biomédica, há diversos processos que se beneficiariam de um nariz eletrônico. Apesar de seu tempo de resposta ser lento quando comparado a tecnologias de espectrofotometria, por exemplo, ainda é mais rápido que análises químicas em laboratório, as quais demandam muito mais tempo e consumo de recursos.

Tendo em vista as aplicações e demandas apresentadas, o presente trabalho tem o propósito de desenvolver um protótipo para coletar odores via sensores de gás e digitalizar os sinais capturados, permitindo a aplicação de ferramentas de classificação posteriormente. O projeto, que se traduz por um nariz eletrônico, inclui a escolha de um maior conjunto de sensores comerciais, a partir das demandas específicas dos compostos a serem analisados, desenvolvimento do circuito auxiliar para coleta de dados, bem como encapsulamento para o protótipo e processamento dos dados a serem coletados.

1.1 Objetivos

Nesta seção serão apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho a ser desenvolvido.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um protótipo de nariz eletrônico para aquisição de dados oriundos de compostos voláteis, com a possibilidade de fácil parametrização de todo o procedimento experimental.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um protótipo de baixo custo, com alta variância de sensores comerciais;
- Possuir portabilidade e versatilidade para o uso em diferentes ambientes;
- Coletar dados de compostos voláteis de amostras em ambiente controlado;
- Desenvolver uma interface de usuário de fácil uso, versátil e sem fio;
- Apresentar um protótipo funcional, capaz de coletar dados de uma amostra, que possibilitem a classificação do composto testado; e
- Garantir a confiabilidade dos dados coletados, garantindo que cada sinal corresponda ao seu respectivo sensor.

1.2 Justificativa

No ramo da agricultura, o processo de identificação do estágio de maturação de diversas frutas ainda é feito manualmente, espera-se, através dos odores produzidos por estas, identificar previamente à colheita aquelas que estão maduras. Nesse contexto, vale ressaltar o trabalho de Voss (2019), que desenvolveu e utilizou um nariz eletrônico para determinar o estágio de maturação dos pêssegos durante o ciclo de crescimento pré-colheita, evidenciando as vantagens sobre métodos tradicionais.

Ademais, definir o ponto de torrefação do café é outro exemplo de classificação em ambiente inóspito, onde é possível utilizar o nariz eletrônico para determinar tal ponto, uma vez que se trata de um ambiente com ar rico em COVs, requisito primordial para o uso do nariz eletrônico. Ainda no mesmo contexto, Barea-Ramos *et al.* (2022) utilizou um nariz eletrônico para analisar a qualidade olfativa dos grãos de café torrados, conseguindo diferenciar os grãos de café torrados submetidos a diferentes tratamentos térmicos, identificando compostos voláteis específicos. A ferramenta também se mostrou útil ao fornecer uma solução rápida e não destrutiva para avaliar a qualidade do café, podendo identificar compostos com atributos positivos e negativos, ajudando a quantificar a qualidade olfativa dos grãos de café. Os autores também sugeriram seu uso na indústria para controle de qualidade, segurança e rastreabilidade dos produtos de café.

A partir do uso do *e-nose*, também é possível identificar compostos maléficos presentes na amostra analisada. Martín-Tornero *et al.* (2021) utilizaram o nariz para poder identificar a existência de acrilamida, uma substância carcinógena produzida durante o processo de esterilização de azeitonas pretas californianas. O mesmo composto foi identificado via um nariz eletrônico no estudo de Mesías *et al.* (2023), mas dessa vez no contexto de amêndoas torradas, evidenciando a versatilidade da ferramenta, que pode ser aplicada eficientemente em diferentes contextos.

Diante das demandas apresentadas, fica clara a aplicabilidade do trabalho a ser desenvolvido, bem como se espera fazê-lo com eficácia para atuar em conjunto com os métodos convencionais, ou até mesmo substituí-los.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresentará tópicos fundamentais a elaboração deste trabalho, apresentando conceitos essenciais ao desenvolvimento e discorrendo sobre os diversos componentes implementados, iniciando por uma revisão de artigos que fundamentam o desenvolvimento do *hardware* utilizado, com foco nas características e especificações dos sensores empregados, bem como nas técnicas experimentais adotadas.

2.1 Estado da arte

O artigo de Fu *et al.* (2024) apresenta um estudo sobre a detecção de nutrientes do solo utilizando uma combinação de sensores de gás MEMS e tecnologia de imagem multiespectral. Para detectar os principais nutrientes do solo, foram utilizados 10 sensores de gás eletroquímicos MEMS da Zhengzhou Weisheng Electronic Technology Co., Ltd. Estes sensores foram projetados para detectar gases produzidos durante a pirólise, permitindo a caracterização do conteúdo de nutrientes como matéria orgânica, nitrogênio total, potássio e fósforo. A fusão de dados multiespectrais e de resposta a gases, otimizada por algoritmos de análise de componentes principais (PCA) e coeficiente de correlação de Pearson (PCC), demonstrou alta precisão na previsão dos níveis de nutrientes, evidenciando a eficácia da abordagem.

No estudo de Kwon e Kim (2024), foi desenvolvido um circuito integrado de leitura (ROIC) para *arrays* de sensores de gás multi-gás, destacando um esquema de calibração de linha de base para mitigar variações do sensor. O ROIC, fabricado com um processo CMOS de 180 nm, oferece baixo consumo de energia e uma taxa de conversão de 50 kSPS. Os sensores Figaro TGS-2600 utilizados demonstraram uma faixa de sensibilidade de 0.54 a 0.23 para concentrações de gás de 5 a 20 ppm, com uma resolução de 39Ω para uma faixa de resistência do sensor de $10 \text{ k}\Omega$ a $90 \text{ k}\Omega$. Este avanço é significativo para a detecção precisa de concentrações de gás.

Wörner, Dörksen e Pein-Hackelbusch (2023) investigaram a capacidade de discriminação de vinhos utilizando narizes eletrônicos equipados com sensores de óxido metálico (MOS) e microbalança de cristal de quartzo (QCM). Os sensores MOS, sensíveis a substâncias voláteis, reagem quimicamente alterando sua resistência, enquanto os sensores QCM detectam moléculas voláteis pela mudança na frequência de vibração. A precisão de discriminação dos vinhos, baseada nas diferenças de SO_2 , atingiu até 90.6%.

O estudo de Martín-Tornero *et al.* (2021) utilizou um nariz eletrônico com onze sensores para prever a presença de contaminantes em amêndoas torradas. Os sensores emitiram sinais correlacionados com níveis de acrilamida, hidroximetilfurfural (HMF) e furfural, demonstrando a eficácia do dispositivo na avaliação da qualidade e segurança de alimentos.

A pesquisa de Barea-Ramos *et al.* (2022) também explorou o uso de narizes eletrônicos para prever contaminantes em amêndoas torradas. Com quatro *chips* eletrônicos totalizando

onze sensores, o dispositivo discriminou atributos sensoriais e previu níveis de contaminantes, confirmando seu potencial como ferramenta quimiométrica preditiva.

Xu, Liu e Zhang (2021) destacaram o uso de narizes eletrônicos na inspeção da qualidade do arroz através da avaliação de compostos orgânicos voláteis (COVs). Os sensores empregados foram sensíveis aos COVs e utilizaram métodos de reconhecimento de padrões para diferenciar perfis de aroma, oferecendo uma alternativa promissora aos métodos tradicionais de avaliação.

O artigo de Rahman *et al.* (2020) desenvolveu um sistema de detecção de gases voláteis utilizando sensores MOS. Com modelos TGS 2600, TGS 2602, TGS 2611 e TGS 2620, além de MICS 5135 e MICS 5521, o sistema diferenciou e classificou gases como acetona, etanol e propano, destacando a importância da detecção de gases para segurança e saúde em várias indústrias.

Wang *et al.* (2023) utilizaram narizes eletrônicos e HS-SPME/GC-MS para analisar perfis voláteis de kiwis afetados por podridão mole. Os sensores do e-nose detectaram compostos como óxidos de nitrogênio e terpenos, contribuindo para a identificação de mudanças voláteis durante a patogenicidade das frutas.

Por fim, Barbosa-Pereira *et al.* (2019) caracterizaram cascas de grãos de cacau utilizando sensores MOS. Os 10 sensores variaram de tipos específicos para compostos aromáticos a sensores de amplo espectro. A análise por PCA permitiu a classificação das amostras, demonstrando o potencial do e-nose na valorização de subprodutos alimentares.

A revisão desses estudos evidencia a flexibilidade e eficácia do *hardware* de narizes eletrônicos em diversas aplicações, justificando a escolha e a quantidade de sensores utilizados no presente trabalho para garantir resultados precisos e confiáveis na classificação e avaliação de compostos. O Quadro 1 apresenta uma comparação entre os diferentes artigos citados ao decorrer da presente seção, mostrando informações como número de sensores utilizados, metodologia aplicada e principais resultados.

Quadro 1 – Comparação entre estudos sobre narizes eletrônicos

Referência	Aplicação	Tipo de Sensores Utilizados	Quantidade de Sensores	Metodologia/Algoritmos	Resultados Principais
Fu (2024)	Detecção de nutrientes do solo	Sensores de gás MEMS	10	PCA, PCC	Alta precisão na previsão de nutrientes do solo
Kwon (2024)	Detecção de gás multi-gás	Figaro TGS-2600	-	Calibração de linha de base	Precisão melhorada e consumo de energia reduzido
Wörner (2023)	Discriminação de vinhos	Sensores MOS e QCM	-	-	Precisão de discriminação de até 90,6% com SO_2
Martín-Tornero (2021)	Previsão de contaminantes em amêndoas	Sensores de óxido metálico	11	Correlação com níveis de contaminantes	Efetivo na avaliação de qualidade e segurança de alimentos
Barea-Ramos (2022)	Previsão de contaminantes em amêndoas	Sensores de óxido metálico	11	Análise multivariada	Predição eficaz de contaminantes e atributos sensoriais
Xu (2021)	Inspeção de qualidade do arroz	Sensores sensíveis a VOCs	-	Reconhecimento de padrões	Alternativa promissora aos métodos tradicionais de avaliação
Rahman (2020)	Detecção de gases voláteis	Sensores MOS (TGS e MICS)	6	PCA	Identificação e classificação eficaz de gases voláteis
Wang (2023)	Análise de podridão mole em kiwis	Sensores sensíveis a diversos compostos	-	HS-SPME/GC-MS, PCA	Identificação de mudanças voláteis durante a patogenicidade
Barbosa-Pereira (2019)	Caracterização de cascas de cacau	Sensores MOS	10	PCA	Classificação e valorização de subprodutos alimentares com perfis de sabor específicos

2.2 Sensores de gás

Sensores de gás vêm sendo aplicados para atingir demandas em diversos campos, entre eles o agrícola, automotivo, e de monitoramento industrial e residencial. Devido à grande influência da Internet das Coisas, a miniaturização dos sensores é cada vez mais incentivada, fatores estes que corroboram para o desenvolvimento de narizes-eletrônicos (LIU *et al.*, 2018).

Segundo Janata (2009) há quatro principais tipos de sensores de gás, sendo estes: (1) sensores de massa; (2) sensores ópticos; (3) sensores térmicos e (4) sensores eletroquímicos (de Óxido Metálico), uma comparação entre estes pode ser vista no Quadro 2.

Quadro 2 – Comparação dos sensores de gás

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Massa	Alta sensibilidade, boa confiabilidade, resposta rápida	Piezoelétricos são dependentes de temperatura
Óptico	Alta sensibilidade, estabilidade em sua vida útil, boa seletividade	Dificuldade na miniaturização, alto custo, alta demanda energética
Óxido Metálico (MOX)	Baixo custo, longa vida útil, resposta rápida	Seletividade relativamente pobre, variação na performance, sensibilidade a gases de fundo
Térmicos (Catalítico)	Baixo custo, resposta rápida	Deteção exclusiva de gases inflamáveis, envenenamento do catalisador, seletividade dependente do sensibilizador

Fonte: (LIU, 2018), adaptado.

Sensores eletroquímicos sofrem mudanças em suas características elétricas quando expostos a gases redutores e oxidantes. Estes são relativamente fáceis de serem fabricados com tecnologias de microfabricação, refletindo em seu custo e disponibilidade. (LIU *et al.*, 2018)

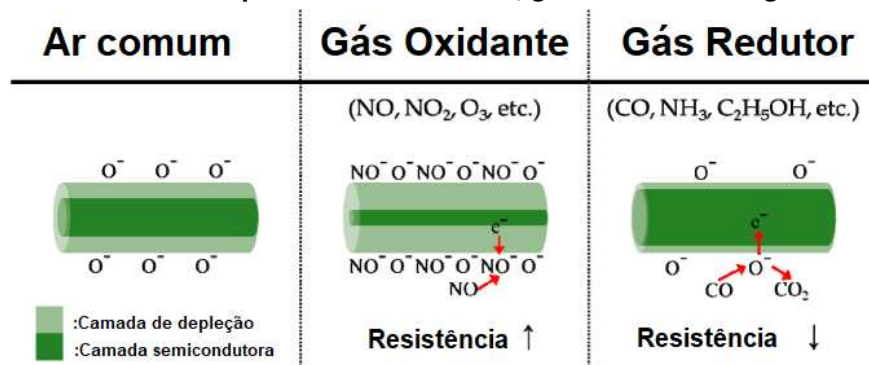
2.2.1 Sensores de Óxido Metálico (MOX)

Segundo (LIU *et al.*, 2018) Os sensores do tipo MOX medem a alteração na condutância da camada de Óxido Metálico, esta categoria domina em termos de implementação em produtos para comercialização, bem como em pesquisas. Os sensores do tipo MOX são utilizados ostensivamente devido ao seu baixo custo, estrutura simples, fabricação facilitada, possibilidade de implementação semi-permanente e alta reatividade (BAK *et al.*, 2019).

É importante entender os efeitos que diferentes gases causam no elemento sensível. Na Figura 1 estão esquematizados os efeitos de gases oxidantes e redutores com os sensores MOX do tipo n.

A resposta de um sensor de gás em comparação com a temperatura se comporta como uma curva em formato de sino, onde a resposta máxima é obtida na faixa ótima de temperatura, a qual varia conforme o tipo de gás alvo na medição e material do substrato (LIU *et al.*, 2018). Por este motivo, além do material sensível, que apresenta uma resistência variável (R_s) depen-

Figura 1 – Sensores do tipo MOX em ar comum, gases oxidantes e gases redutores

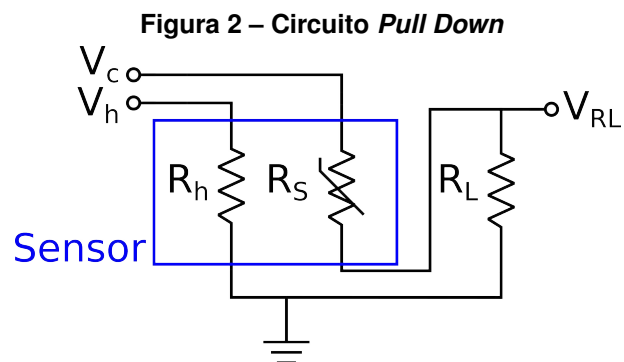


Fonte: (BAK, 2019), adaptado.

dente da concentração de gases, que normalmente é representado. Devido a sua natureza de operação, boa parte dos sensores devem conter um elemento de aquecimento, e um sistema para aferir a temperatura do mesmo (LIU *et al.*, 2018).

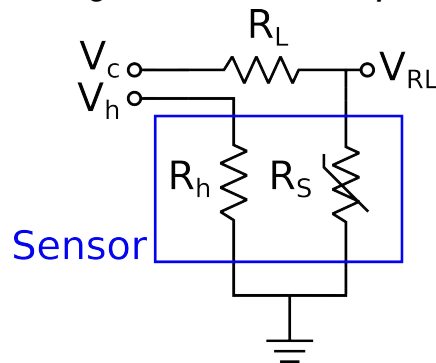
Em modelos comerciais o aquecimento é atingido através de resistências, já implementadas nos pacotes dos sensores e cuja simbologia na documentação foi convencionada como (R_h), cujos valores são ajustados pelos fabricantes para os gases alvo, sob quais estes são comercializados.

Com implementação bastante semelhante, apesar de várias possibilidades de leitura, segundo a documentação, tais sensores demandam uma resistência em série (R_L) com o elemento sensível, criando circuitos de *Pull Up* ou *Pull Down*. Os diagramas de implementação podem ser vistos nas Figuras 2 e 3.



Fonte: Autoria própria (2024).

Os potenciais V_c e V_h correspondem respectivamente à tensão aplicada sobre o elemento sensível e à tensão sobre o resistor de aquecimento, com valores variando entre modelos e fabricantes, porém com 5V sendo um dos valores possíveis, quase que unanimemente. Os valores de R_s variam em uma faixa pré-estabelecida, a qual deve ser utilizada, através da

Figura 3 – Circuito *Pull Up*

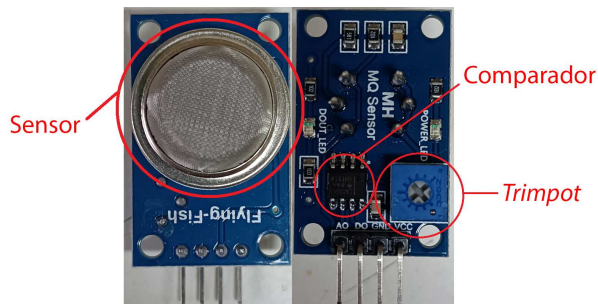
Fonte: Autoria própria (2024).

Equação 1, para dimensionar R_L para que o valor de V_{RL} não ultrapasse a tensão máxima a ser aferida futuramente.

$$V_{RL} = V_c \cdot \frac{R_L}{R_L + R_S} \quad (1)$$

Apesar da implementação relativamente simples, encontram-se módulos com certa facilidade, sendo compostos, além do pacote do próprio sensor, por uma resistência de leitura pré-fixada, além de um circuito comparador, cuja saída binária pode ser ajustada mediante um *trimpot* para contemplar uma faixa específica. Um exemplo de módulo comercializado pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Módulo do sensor MQ-X



Fonte: Autoria própria (2024).

Algumas famílias e modelos de sensores se destacam entre as opções comerciais mais comuns, tanto pelo baixo custo, como pela disponibilidade, dentre estas opções destacam-se as famílias *MQ-x* da fabricante chinesa *Winsen* e *TGS-X* da japonesa *Figaro*.

Família MQ-x: Os sensores exemplificados pela Figura 5 são fabricados em encapsulamento de Baquelite e contam com 6 pinos para conexão às resistências sensíveis e de aquecimento.

Família TGSxxx: No caso dos sensores fabricados pela *Figaro*, há dois tipos de encapsulamento, os quais podem ser vistos na Figura 6, primeiramente o modelo TGS822, se-

Figura 5 – Exemplo de sensor da série MQ-x



Fonte: (WINSEN, 2015).

melhante àqueles da família *MQ-x* apresentado anteriormente, e outro mais compacto, para os modelos TGS2600, TGS2602 e TGS2603, implementados em encapsulamentos TO-5.

Figura 6 – Sensor TGS822 e exemplo da série TGS26xx



(a) Sensor TGS822

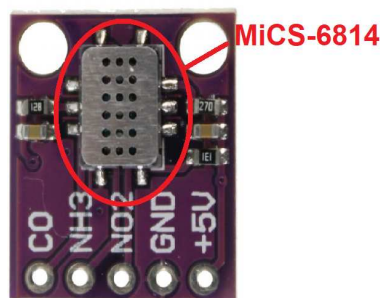


(b) Exemplo da série TGS26xx

Fonte: adaptado de (FIGARO, 2002), (FIGARO, 2023).

Devido à possibilidade de fabricação em massa e ao potencial de integração a circuitos de condicionamento de sinal (LIU *et al.*, 2018), é cada vez mais comum a implementação em pacotes com múltiplos elementos sensíveis, a exemplo temos o *shield*, baseado no sensor MiCS-6814 da *SGX Sensortech*, com saídas prontas para uso, ou seja, sem necessidade de associações externas, as respostas deste podem ser adquiridas diretamente. Um exemplo deste *shield* pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Módulo MiCS-6814



Fonte: Autoria própria (2024).

2.3 Microcontrolador

Dado o escopo do projeto, fica evidente a necessidade de aquisição e salvamento dos dados dos sensores, comunicação com o usuário, sinais de controle para acionamento de válvulas solenoides e outros dispositivos, além de outras funcionalidades desejadas. Assim, o uso de um microcontrolador, preferencialmente em formato de placa de prototipagem rápida, mostra-se de suma importância. Logo, o objetivo da presente seção é discorrer sobre o processo de escolha do microcontrolador empregado no projeto.

Considerando a demanda de compatibilidade com o protocolo I²C, necessidade de *Wi-Fi* para a IHM e de boa velocidade de processamento para possibilitar uma boa frequência de amostragem, algumas opções de placas de prototipagem serão apresentadas.

As principais alternativas, sendo a disponibilidade o principal fator para apresentação destas, serão comparadas, entre suas características mais relevantes ao desenvolvimento do projeto, no Quadro 3.

Quadro 3 – Plataformas de prototipagem

	Arduino UNO	Arduino Mega	ESP32-S3-DevKit-V1	Raspberry Pi Pico	Raspberry Pi
Núcleos	1	1	2	2	4
Frequência de operação (MHz)	16	16	160	133	1500
Memória flash	32kB	256kB	16MB	2MB	Apenas via microSD
Memória RAM	2kB	8kB	512kB	264kB	1, 2 ou 4GB
Wi-Fi	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Bluetooth	Não	Não	Sim	Não	Sim
Pinos digitais	14 (6 PWM)	54 (15 PWM)	34 (17 PWM)	26 (16 PWM)	28 (2 PWM)
Pinos ADC	6	16	15	3	0
Características do ADC interno	10 bits, até 15 ksps	10 bits, até 15 ksps	12 bits, até 6 Msps	12 bits, até 500 ksps	Sem ADC interno
Alimentação	2.7-5.5V	6-20V	2.3-3.6V	1.8-5.5V	4.75-5.25V
Interface I ² C	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

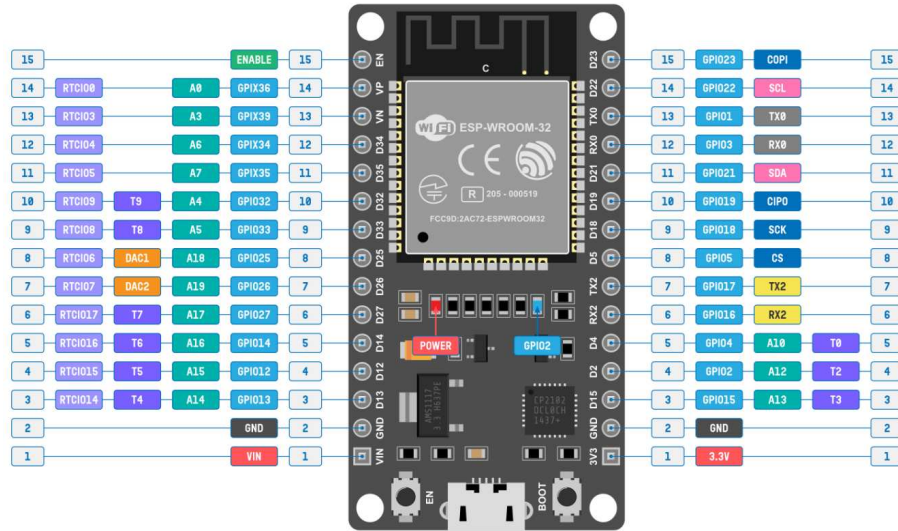
Fonte: adaptado de (ARDUINO, 2023b), (ARDUINO, 2023a), (ESPRESSIF, 2023b), (Raspberry Pi Ltd, 2022), (Raspberry Pi Ltd., 2024).

2.3.1 ESP32

Dentre as alternativas apresentadas destaca-se o ESP32 por atender aos requisitos básicos de interface, apresentar dois núcleos e possuir uma frequência de CPU elevada quando comparada aos demais microcontroladores, além de conectividade *Wi-Fi* e *Bluetooth* nativas, características estas que conferem mais possibilidades em termos de interface e métodos de transmissão de dados. Além disso, seu suporte nativo elimina a necessidade de *cases* ou módulos adicionais, o que acarretaria custos adicionais. Outro ponto a ser destacado é o custo do microcontrolador escolhido, já que é o que apresenta melhor custo-benefício entre os elencados no Quadro 3. O detalhamento das conexões (*pinout*) do ESP32 em plataforma de prototipagem, pode ser visto na Figura 8. No entanto, vale ressaltar que há diversos modelos diferentes do mi-

crocontrolador em questão, diferindo em número de pinos, tipo de conector de alimentação, tamanho, *pinout*, entre outros fatores.

Figura 8 – Pinout do ESP32-DevKit-V1, plataforma DOIT



Fonte: (CIRCUITSTATE, 2022), adaptado de: <https://www.circuitstate.com/wp-content/uploads/2022/12/ESP32-DevKit-V1-Pinout-Diagram-r0.1-CIRCUITSTATE-Electronics-2.png>.

Quanto à conectividade física, a plataforma conta com 15 entradas, divididas em dois ADCs, diversas entradas/saídas digitais, pinos para comunicação via protocolo I²C e entradas de alimentação. No entanto, o conversor AD do ESP32 não foi utilizado em nosso projeto, uma vez que um conversor Analógico-Digital foi introduzido diretamente na placa de sensores, enviando os dados lidos via protocolo I²C.

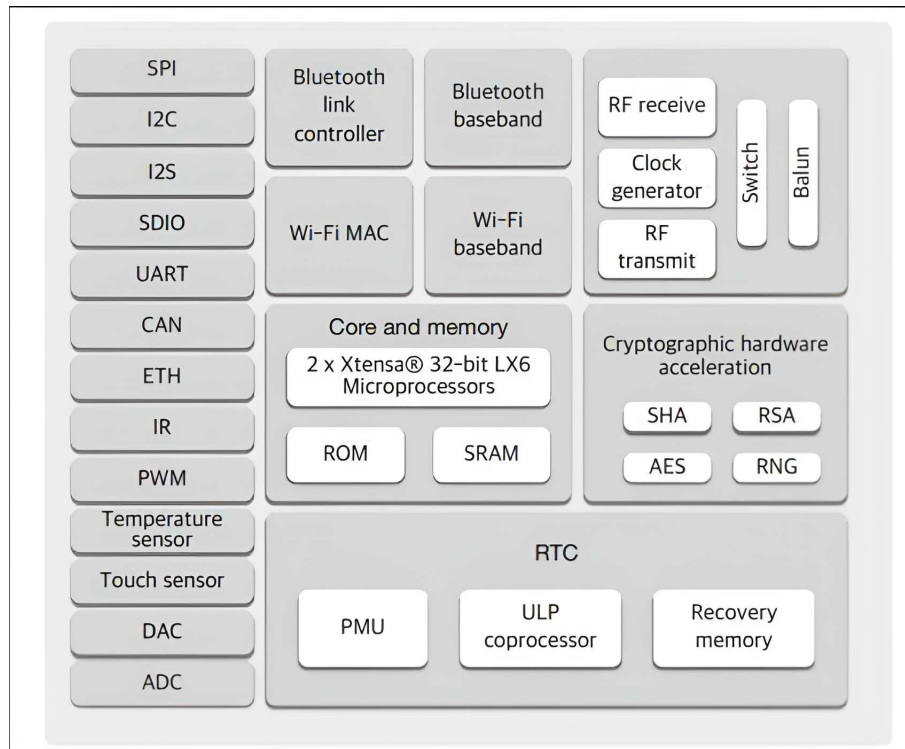
Conforme disponibilizado pelo fabricante, a Figura 9 mostra um diagrama de blocos da estrutura interna do ESP32, diagrama esse útil para entender como suas estruturas foram divididas e outras informações importantes, tal como o número de núcleos. No caso, o microcontrolador conta com dois núcleos, sendo um fator crucial para o presente projeto, uma vez que podemos destinar um núcleo exclusivamente para a leitura dos sensores e gestão dos dados no cartão microSD, enquanto o outro é responsável pela interface e controle do sistema.

2.4 Conversores Analógicos Digitais

Os conversores Analógico-Digitais (AD) são dispositivos que transformam sinais analógicos contínuos em sinais digitais discretos. Esta conversão é essencial para que sistemas digitais, como microcontroladores e microprocessadores, possam processar informações reais, que geralmente são analógicas (temperatura, pressão, som, luz, etc.) (TOCCI, 2007).

No contexto dos microcontroladores modernos, como os da família PIC, AVR, ARM, e ESP, a maioria possui conversores AD integrados. Estes conversores variam em resolução (8 bits, 10 bits, 12 bits, etc.) e taxa de amostragem, permitindo aos microcontroladores realizar a

Figura 9 – Diagrama de blocos do ESP32-DevKit-V1, plataforma DOIT



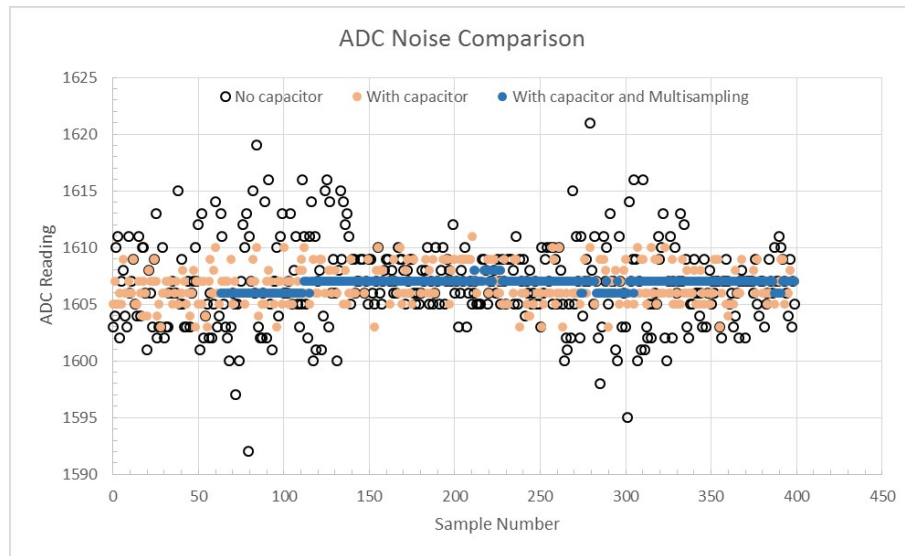
Fonte: (ESPRESSIF, 2023b).

conversão diretamente, sem a necessidade de componentes externos. Com a implementação de conversores AD integrados diretamente aos microcontroladores, há uma série de vantagens, como redução da necessidade de componentes externos, o que pode simplificar o *design* e reduzir custos de projeto e comunicação otimizada entre o AD e o núcleo do microcontrolador (BIGNELL; DONOVAN, 2018).

Por outro lado, por se tratarem de dispositivos de uso geral, os microcontroladores costumam ter certa imprecisão em seus conversores. A exemplo, o ESP32 tem como sugestão do próprio fabricante a utilização de técnicas de *oversampling* e implementação de capacitores nas entradas do ADC, visando à redução do erro. A Figura 10 apresenta uma comparação fornecida pelo fabricante entre diferentes técnicas sugeridas para a redução do erro do AD interno do ESP32.

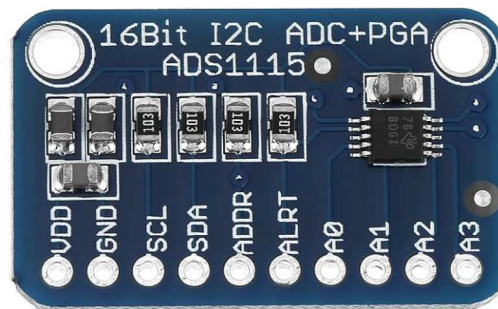
Por estes motivos, trabalhos como o de Chen *et al.* (2024a), empregam o uso de ADCs externos, inclusive com resoluções maiores, 24 *bits* neste caso, buscando maior precisão dos dados coletados. Propostas de baixo custo, que utilizam sensores da família MQ-x, empregam ADCs de prateleira com precisão intermediária, como o ADS1115, da Texas Instruments (CHEN; LIAO; FANG, 2024).

O ADS1115 é um Conversor Analógico-Digital de relativa disponibilidade e baixo custo, que possui resolução de 16*bits* e taxa de resposta máxima de até 860 amostras por segundo, com interface I²C nativa (INSTRUMENTS, 2012). São encontradas facilmente implementações

Figura 10 – Ruído no ADC do ESP32

Fonte: (ESPRESSIF, 2023a).

para prototipagem rápida, como a da Figura 11, com a implementação padrão recomendada pelo fabricante implementada em uma PCI com conexões no padrão 2.54 mm.

Figura 11 – Implementação ADS1115

Fonte: Autoria própria (2024).

2.5 Multiplexadores

Multiplexadores, também comumente chamados de MUX, são dispositivos fundamentais em sistemas de comunicação e processamento de sinais, pois permitem a transmissão de múltiplos sinais de entrada por um único canal de saída, reduzindo a complexidade e o custo dos sistemas de comunicação e processamento.

Trata-se de um dispositivo digital que seleciona uma de várias entradas de dados e a direciona para uma única linha de saída. A seleção da entrada específica é controlada por sinais de seleção, sendo entradas adicionais ao MUX. Um multiplexador típico possui 2^n entradas de dados e n linhas de seleção, onde n é o número de bits necessários para selecionar uma entre as 2^n entradas (BIGNELL; DONOVAN, 2018). Dessa forma, uma aplicação na qual os

multiplexadores são comuns é quando o número de portas de entrada de um determinado dispositivo é menor que o número de dispositivos que precisam ser lidos.

Ainda sobre multiplexadores, vale ressaltar que podem ser tanto digitais como analógicos, a depender dos sinais com que se trabalha. Um MUX analógico é capaz de reproduzir em sua saída o mesmo sinal da entrada selecionada, com tensões analógicas que podem variar na faixa de fornecimento de tensão.

2.6 Circuitos de acionamento

As possibilidades para circuitos de acionamento e controle são das mais diversas, levando em consideração os objetivos definidos na Seção 1.1, as subseções seguintes contêm definições gerais de algumas destas soluções.

2.6.1 Transistores

Os transistores são dispositivos semicondutores que podem atuar como amplificadores ou interruptores eletrônicos. Eles são fundamentais na eletrônica moderna devido à sua capacidade de controlar correntes elétricas. Existem principalmente dois tipos de transistores: Bipolar Junction Transistor (BJT) e Field Effect Transistor (FET), sendo subdividido em variantes como MOSFETs, JFETs, entre outros (INTERNATIONAL, 1967).

Quanto ao funcionamento dos BJTs, são compostos por três camadas de material semicondutor tipo N e P. Funciona em três modos: corte, saturação e região ativa. A corrente de base controla a corrente de coletor. Já os do tipo FET possuem uma estrutura de três terminais: *source*, *drain* e *gate*. A tensão no *gate* controla a corrente entre o *source* e o *drain*. Vale perceber que, enquanto os BJTs são controlados por corrente, os do tipo FET dependem da tensão aplicada ao *gate*. Tal diferenciação faz com que possuam diferentes nichos de aplicação, sendo que os BJTs são normalmente utilizados em sistemas de áudio ou de baixa potência, enquanto os do tipo FET são comumente aplicados em circuitos chaveados, como em conversores estáticos de potência, por exemplo. No entanto, devido à limitação da tensão de saída de alguns microcontroladores, como é o caso do ESP32, em que sua saída é limitada em 3,3V, o uso de transistores do tipo FET torna-se restrito, pois precisa de um circuito auxiliar para poder ser acionado com 3,3V. Nesse contexto, é comum encontrar transistores bipolares (INTERNATIONAL, 1967).

2.6.2 Par Darlington

É possível combinar transistores bipolares em topologias especiais, dentre as quais está o par Darlington, tratando-se de uma configuração de dois transistores conectados de tal forma

que a corrente amplificada pelo primeiro transistor é ainda mais amplificada pelo segundo. Esta configuração resulta em um ganho de corrente muito alto, além de alta impedância de entrada e baixa impedância de saída. Dessa forma, mesmo uma pequena corrente de controle consegue controlar grandes correntes no coletor. Vale mencionar que também é possível usar transistores do tipo FET para gerar pares Darlington, porém suas características tornam sua aplicação desvantajosa em nosso projeto, optando-se pelo par Darlington gerado a partir de BJTs (BISHOP, 2001).

2.6.3 Relés

Diferentemente do acionamento por meio de transistores, onde usualmente não há isolamento entre a malha de controle e a de potência, tal benefício pode ser alcançado com o uso de relés. Eles consistem em dispositivos eletromecânicos que utilizam uma bobina para criar um campo magnético que aciona um conjunto de contatos, permitindo a comutação de circuitos de alta potência com um sinal de baixa potência, de forma isolada. Outro benefício frente aos transistores é que a queda de tensão sobre a chave ao ser acionada é muito menor do que os transistores, sobretudo o par Darlington, que possui maior tensão de saturação entre coletor e emissor. Nesse contexto, o dispositivo foi usado em nosso projeto justamente por esta segunda característica, possibilitando que a tensão proveniente da fonte de alimentação seja transmitida quase que integralmente para a placa de sensores (GUREVICH, 2005).

2.7 Interface Homem Máquina

A Interface Homem-Máquina (IHM) é amplamente utilizada em sistemas tecnológicos, tais como computadores, *smartphones*, eletrodoméstico e outros aparelhos eletrônicos, para que haja um meio de troca de informações entre a máquina e o usuário e vice-versa. Mourtzis, Angelopoulos e Panopoulos (2023) destacam que as Interfaces Homem-Máquina são cruciais para a comunicação entre humanos e máquinas, permitindo uma interação mais intuitiva e produtiva. Ainda segundo os autores, as IHMs facilitam a colaboração, melhoram a segurança e aumentam a eficiência ao integrar capacidades humanas, como criatividade e julgamento, com a precisão e consistência das máquinas. Dessa forma, o conceito de IHM permite um meio que permite desde a visualização de dados de funcionamento do dispositivo até o seu controle a partir de funcionalidades feita pelo usuário. Assim, no contexto do trabalho proposto, para que houvesse interação entre o microcontrolador e o usuário, fez-se necessária a construção de uma IHM. Com isso, através da funcionalidade de *Wi-Fi* do ESP32, foi possível tanto mostrar para o usuário dados das leituras dos sensores como também requisitar do usuário as condições em que as coletas serão feitas. Por fim, as subseções a seguir visam fornecer uma explicação sucinta da construção e funcionamento da IHM. No entanto, por se tratar de um código com-

plexo, apresentaremos apenas pseudocódigos e figuras da interface disponibilizada ao usuário, os quais estão disponíveis na Subseção 3.2.3.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e metodologias empregadas para o desenvolvimento do objeto deste trabalho.

3.1 Materiais

Considerando a seletividade relativamente baixa dos sensores MOX, é importante implementar modelos que, além de possuírem baixo custo e relativa alta disponibilidade, sejam sensíveis a conjuntos diferentes de gases. Dentre as aplicações e soluções apresentadas na Seção 2.1, selecionou-se um conjunto de 16 sensores, os quais estão expostos no Quadro 4.

Quadro 4 – Características dos Sensores de Gás Utilizados

Sensor	Potência (mW)	Escopo de gases sensíveis e concentração
MQ-2	<900	200-10000ppm GLP, CH ₄ , H ₂ , CO, Etanol, fumaça e C ₃ H ₈
MQ-3	<900	0,1-10mg/L GLP, CH ₄ , CO, Etanol, C ₆ H ₆ e C ₆ H ₁₄
MQ-4	<900	200-10000ppm GLP, CH ₄ , H ₂ , CO, Etanol e fumaça
MQ-5	<800	200-10000ppm GLP, CH ₄ , H ₂ , CO e Etanol
MQ-6	<750	200-10000ppm GLP, CH ₄ , H ₂ , CO e Etanol
MQ-7	<350	50-4000ppm CH ₄ , H ₂ , CO e Etanol
MQ-8	<900	200-10000ppm GLP, CH ₄ , H ₂ , CO e Etanol
MQ-9	<350	200-1000ppm CO; 200-10000ppm GLP e CH ₄
MQ-135	<800	10-200ppm CO ₂ , NH ₄ e Etanol
MQ-137	<800	5-200ppm NH ₃
MQ-138	<850	10ppm-1000ppm Benzeno, 10ppm-1000ppm Etanol, 10ppm-3000ppm NH ₃
TGS822	<715	50-5000ppm CH ₄ , Etanol, C ₄ H ₁₀ , CO, C ₃ H ₆ O, C ₆ H ₆ e C ₆ H ₁₄
TGS2600	<230	1-100ppm H ₂ , CH ₄ , Etanol, C ₄ H ₁₀ e CO
TGS2602	<305	0,1-3ppm H ₂ S; 1-30ppm NH ₃ , Etanol e C ₇ H ₈
TGS2603	<240	0,1-3ppm C ₃ H ₉ N; 0,3-3ppm H ₂ S, CH ₄ S; 1-30ppm Etanol, H ₂
MICS-6814	<205	>1000ppm CO, H ₂ , CH ₄ , C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ ; >500ppm NH ₃ , Etanol; >10ppm NO ₂

Fonte: Adaptado de (WINSEN, 2015), (FIGARO, 2002), (FIGARO, 2023) e (SGX SENSORTECH, 2015).

Além das características de resposta, é importante notar as potências dissipadas pelo conjunto selecionado, lembrando da premissa de portabilidade para o produto final, por isso o Quadro 4 apresenta também as potências máximas dissipadas por cada sensor do conjunto.

Além dos sensores apresentados, para o desenvolvimento do protótipo foram utilizados os materiais descritos nos Quadros 5, 6 e 7.

Para leitura das respostas em níveis de tensão, utilizou-se o Multiplexador 74HC4067, e o ADS1115, além de um capacitor como filtro na entrada e um resistor para verificação da estabilidade dessa tensão, utilizando o próprio ADC.

Devido à dependência de fatores como umidade e temperatura do ambiente de coleta, e a demanda de verificar a pressão sob a qual os sensores estão expostos, selecionou-se o sensor BME-280 para tais objetivos, que utiliza comunicação via Protocolo I²C, eliminando condutores adicionais.

Quadro 5 – Placa de Sensores - Componentes Adicionais

Material	Quantidade	Especificação
Sensor de Umidade/Pressão/Temperatura	1	BME280
ADC	1	ADS1115
Multiplexador	1	74HC4067
Diodo Zener	1	3,3V - 0,5 W
Capacitor	1	100 nF Cerâmico
Conector Dupont (com trava)	2	4 vias - 2,54 mm
Resistor	1	47 Ω - 1/4 W
Resistor	1	VCE
Resistores R_L	15	Diversos - 1/4 W

Fonte: Autoria própria (2024).

Os materiais utilizados na placa de controle e processamento estão descritos no Quadro 6, que compreende todo o circuito de suporte aos componentes de aquisição. Por fim, os demais

Quadro 6 – Placa de Controle

Material	Quantidade	Especificação
Placa de prototipagem	1	ESP32 (DOIT DevKit V1)
Relé	1	5 VDC - 10 A/250 VAC
Par Darlington	3	TIP122
Transistor BJT	1	BC337
Diodo	3	1N4148
Capacitor	1	100 nF Cerâmico
Capacitor	1	5,6 nF Cerâmico
Resistor	1	470 Ω - 1/4 W
Resistor	3	10 k Ω - 1/4 W
Conector Dupont (com trava)	2	4 vias - 2,54 mm
Conector Dupont (sem trava)	3	2 vias - 2,54 mm
Módulo e Cartão microSD	1	SPI - 2 GB
Módulo Breakout	1	USB-C

Fonte: Autoria própria (2024).

componentes utilizados no protótipo estão listados no Quadro 7. Pela alta diversidade destes, optou-se por omitir algumas características e focar em suas especificações mais relevantes.

Quadro 7 – Aparato Físico e Experimental

Material	Quantidade	Especificação
Dispenser de Vidro Hermético	1	500mL
Válvula solenoide unidirecional NF	1	4-6V/100mA
Válvula solenoide bidirecional NA/NF	1	4-6V/200mA
Mangueiras de silicone	4	3mm Ø
Cabos de alimentação	2	18 AWG
Cabos de comunicação	6	24 AWG
Kitassato	1	125mL
Suportes impressos em 3D	3	Material: PETG
Tubo de ensaio	1	15mL

Fonte: Autoria própria (2024).

Foram confeccionadas duas placas de circuito impresso (PCIs), uma para a matriz de sensores, colocada no pote, e outra para o circuito de controle, posicionada sobre a tábua e conectada aos demais circuitos, ambas mostradas em detalhes na Seção 4.1.

Para fazer a interface entre o dispenser, válvulas solenoide, e kitassato foram utilizadas mangueiras de silicone de 3 mm de diâmetro interno, proporcionando uma boa interface entre estes componentes. Já para o pote hermético, foram feitos dois furos em sua tampa para a passagem dos tubos, vedando em seguida com silicone e acionando a bomba a vácuo para que a pressão negativa proporcionasse melhor penetração do elemento vedante nas cavidades, e consequentemente, melhor estanqueidade. Já para o kitassato, por conta do maior diâmetro de saída, não foi possível conectar diretamente a mangueira. Assim, foi feita uma adaptação usando uma mangueira de teflon de 2 mm de diâmetro interno e 4 mm de externo, introduzindo-a no orifício do kitassato. Depois, com a parte fora do furo, usou-se novamente a mangueira de silicone e espalhou-se silicone entre as partes para uma melhor vedação.

Além disso, é importante ressaltar a atenção dada à escolha de materiais específicos para lidar com vácuo parcial, como é o caso do kitassato e do pote hermético. No caso do kitassato, optou-se por tal componente para se depositar a amostra por se tratar de um dispositivo amplamente utilizado em laboratórios para filtragem a vácuo, tratando-se, pois, de um bom recipiente para se colocar a amostra. Além disso, optou-se por um modelo de volume reduzido para minimizar o efeito do ar remanescente no reservatório ao se acionar a válvula e normalizar a pressão interna com a do pote hermético. Já a respeito deste último, sua escolha se deu por já possuir como fim armazenar alimentos sob baixas pressões para conservá-los por mais tempo. De fato, os testes preliminares da bomba em conjunto com o pote se mostraram promissores, pavimentando assim a escolha pelos demais componentes necessários, tais como mangueiras de silicone para as conexões e o silicone acético para auxiliar na interface com o pote. Nesse contexto, o silicone foi utilizado apenas nas interfaces entre as mangueiras e fios e o pote, preenchendo e vedando as conexões. Quanto às demais interfaces das mangueiras, não foi necessário usar silicone, uma vez que se encaixaram bem as válvulas solenoides e à bomba, exceto o kitassato, que precisou de um pouco de silicone para auxiliar na vedação.

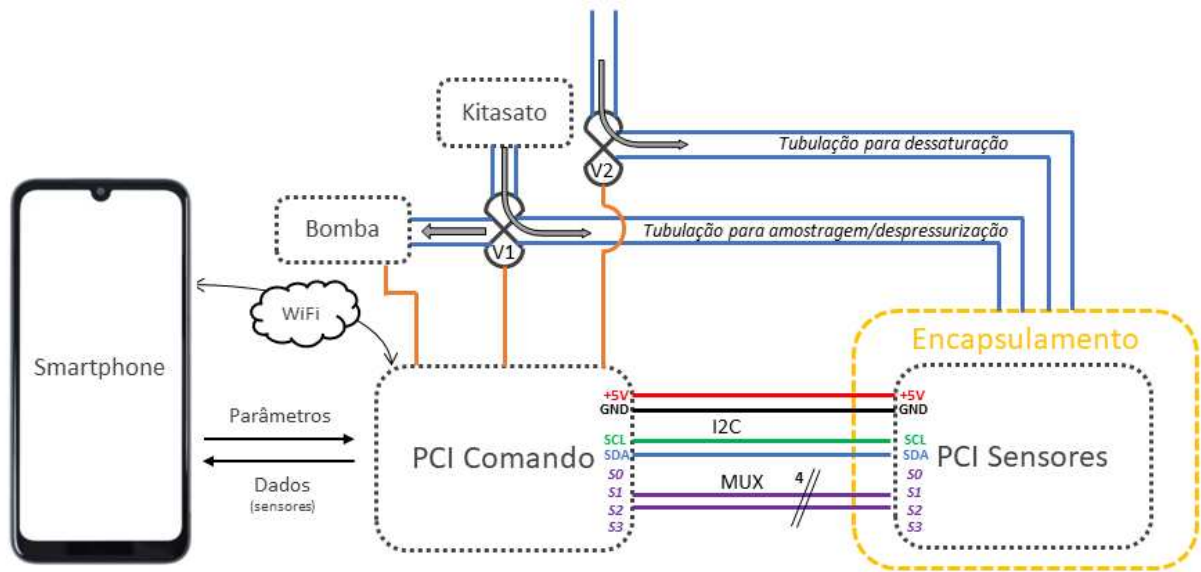
3.2 Métodos

3.2.1 Concepção do protótipo

Considerando os objetivos definidos e conjunto de sensores selecionado, elaborou-se o diagrama geral do protótipo, conforme representado pela Figura 12.

Optou-se por dividir o protótipo em duas placas de circuito, uma para controle e processamento e outra para sensores, desde essa etapa discutiu-se a possibilidade de implementar o ADS1115 diretamente na placa de sensores, pela relativa facilidade de implementação do protocolo I²C, demandando apenas 2 condutores e reduzindo consequentemente a complexidade dos métodos de vedação.

Figura 12 – Diagrama Geral do Protótipo



Fonte: Autoria própria (2024).

Uma grande vantagem desta abordagem é a integridade dos sinais adquiridos, pelos sensores estarem conectados à mesma placa que o ADC, através de trilhas com dimensões não maiores que 10 cm e sem conectores ou quaisquer outros métodos que pudessem comprometer os níveis de tensão a serem aferidos.

Definiram-se 8 vias de interface entre as placas, além da comunicação I²C, 4 vias de endereçamento para o multiplexador, cuja utilização seria inevitável, e as restantes para alimentação de toda a placa de sensores. Ainda na placa de comando e processamento, pretendeu-se que tivesse a entrada da alimentação e saída de controle das válvulas solenoides e bomba.

Previu-se a utilização do menor número de válvulas possível, levando em consideração os componentes disponíveis, definiu-se a utilização de uma válvula bi-direcional para o processo de amostragem e extração de ar do encapsulamento e outra unidirecional para a entrada de ar nas etapas de dessaturação.

Ademais, objetivou-se fazer toda a parametrização dos procedimentos de coleta e extração de dados através de comunicação por *Wi-Fi*. Diversos dispositivos podem ser utilizados para este fim, mas para estabelecer critérios de continuidade, consideraremos um *smartphone* como parte integrante do projeto nas seções seguintes.

3.2.2 Projeto eletrônico e aparato físico

Considerando os objetivos definidos para o projeto e alternativas existentes no mercado, optou-se por utilizar um ESP32 como peça central para a parte de processamento e controle, sendo ele responsável também, através de seus 2 núcleos, pela interface de controle a ser

desenvolvida. Adicionalmente, previu-se um módulo com cartão μSD para armazenar os dados provenientes das coletas, interfaceado via protocolo *SPI* com o ESP32.

Apesar de ter sido definido por uma questão física e eletrônica geral do protótipo, para se evitar o uso de outro AD e utilizar o interno do ESP32, poderia tê-lo posicionado junto à placa dos sensores. No entanto, chegou-se à conclusão de que seria desfavorável pelos seguintes motivos:

- Não seria possível manter o cabo USB conectado ao ESP32 durante as aquisições, impossibilitando a transmissão dos dados desta forma;
- Difícil reinicialização do sistema e de *upload* de novos códigos, devido à necessidade de interação física com o microcontrolador;
- Devido à interdependência do segundo ADC do ESP para utilização do *Wi-Fi*, havia a possibilidade de interferência do sinal *Wi-Fi* com os sinais de dados;
- Seria necessária uma interface com mais cabos atravessando a câmara, dificultando sua vedação.

Ademais, seguir com a solução sugerida pelo fabricante demandaria uma número maior de componentes externos (capacitores) e limitaria a frequência de aquisição drasticamente.

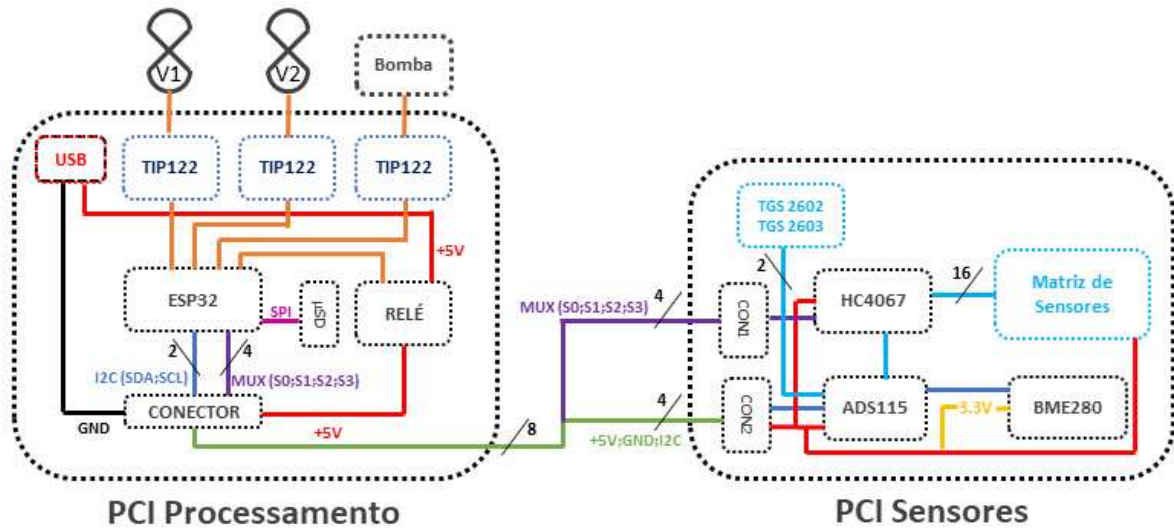
Definida a utilização do ADS1115 e a quantidade de sinais a serem adquiridos sabida, foi necessário implementar um multiplexador analógico, devido à limitação de portas de entrada do conversor AD. Isto é, ao todo, temos 18 sinais analógicos provenientes dos sensores analógicos e apenas quatro entradas no ADS1115, necessitando, portanto, de um multiplexador coordenado com o AD de forma a realizar a leitura de todos os sinais. Isso foi alcançado ao se implementar o MUX de modelo 74HC4067, cuja escolha se deu pela disponibilidade no laboratório e o cumprimento dos requisitos de projeto. Sendo assim, a coordenação entre o MUX e o AD se deu via *software*, sendo que os 16 canais de entrada do MUX são passados para a entrada A0 do AD e outros dois sensores analógicos estão conectados às entradas A1 e A2 do ADS1115. O canal restante, isto é, A3, foi aproveitado de forma a ler a tensão de entrada da placa de sensores de forma a fornecer um referencial para as leituras subsequentes.

Com a definição dos principais componentes da placa de sensores, elaborou-se o diagrama funcional presente na Figura 13.

Devido à característica de resposta intrínseca aos sensores *MOX*, que depende de temperatura e umidade e a necessidade de aferir a pressão no interior do encapsulamento com precisão, empregou-se o sensor BME-280 para tais fins, onde sua inserção foi tão simples quanto prolongar as vias da interface I^2C e utilizar um rebaixador de tensão, devido a sua tensão de operação ser de 3.3V, para tal utilizou-se um diodo zener em anti-paralelo e um resistor de 47Ω em série com a fonte.

Outra etapa importante é a definição das resistências R_L , pois os sensores MQ-8, MQ-137 e MQ-138 não tem os valores de R_s informados diretamente em seus *datasheets*, portanto,

Figura 13 – Diagrama Eletrônico



Fonte: Autoria própria (2024).

para estes utilizaram-se os valores sugeridos pelo fabricante, para os demais sensores, foram selecionadas as resistências comerciais mais próximas do meio da escala de R_s , a fim de maximizar a resolução da resposta. No caso do MiCS-6814 a implementação foi direta, visto que o módulo escolhido já possui os componentes necessários à utilização deste.

Quadro 8 – Valores comerciais de R_L

Sensor	$R_s(k\Omega)$	$R_L(k\Omega)$
MQ-2	2-20	10
MQ-3	2-20	10
MQ-4	2-20	10
MQ-5	10-60	20
MQ-6	10-60	20
MQ-7	2-20	10
MQ-8	-	4,7
MQ-9	2-20	10
MQ-135	30-200	100
MQ-137	-	4,7
MQ-138	-	4,7
TGS822	1-10	4,7
TGS2600	10-90	47
TGS2602	10-100	47
TGS2603	20-200	100

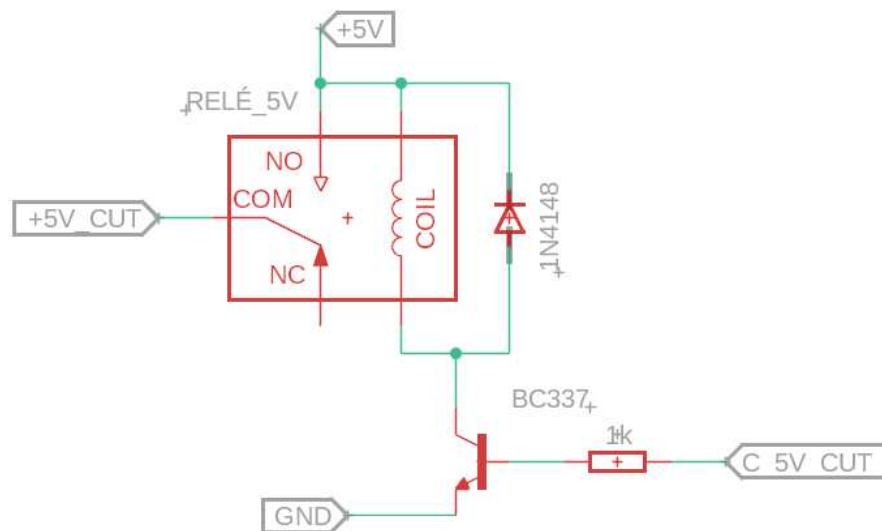
Fonte: Autoria própria (2024).

A característica de operação do protótipo prevê um tempo de configuração dos parâmetros de coleta. Durante este tempo os sensores devem permanecer desligados, portanto se demanda a implementação, na placa de controle e processamento, de um circuito para interromper a linha de 5V e para isto foi escolhido um Relé.

A principal motivação para essa escolha, além da disponibilidade de componentes e facilidade de implementação, foi o fato de que, por se tratar de uma chave mecânica, não haveria queda de tensão através do componente ou alteração devido à temperatura, como seria no caso de um *mosfet*, por exemplo.

Além da impossibilidade de acionar o relé diretamente por uma saída digital do ESP32, e também por operar com 3,3V, demandou-se a implementação de um BJT para acionamento da bobina do relé, sendo escolhido o BC337, por atender as demandas do projeto, dimensionou-se o resistor de base para que operasse em saturação e selecionou-se o valor comercial mais próximo ($1\text{ k}\Omega$), além disso utilizou-se um diodo (1N4148) em anti-paralelo, para proteger o circuito de acionamento e consequentemente o microcontrolador.

Figura 14 – Comando do Relé



Fonte: Autoria própria (2024).

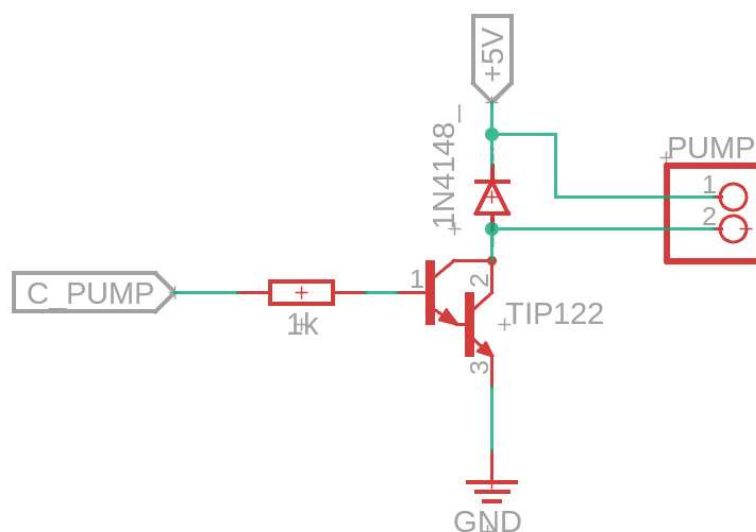
Considerando as alternativas possíveis para o acionamento das válvulas solenoide e bomba, optou-se por um par *Darlington* (*TIP122*), principalmente pela baixa corrente de base demandada, e pela disponibilidade e facilidade de implementação, visto que, dentre os materiais disponíveis, apresentou um comportamento estável durante as validações em placas de prototipagem, demonstrando confiabilidade.

Finalizando o aparato físico, após confeccionadas as placas de circuito impresso, utilizou-se um pote hermético para alojar a placa dos sensores, cuja tampa foi perfurada para passar os condutores e realizar a duas interfaces via mangueiras de silicone, com as válvulas.

A bomba a vácuo e kitassato foram conectados à válvula bi-direcional com mangueiras de silicone de 3 mm de diâmetro interno, a válvula unidirecional foi conectada ao pote de maneira semelhante, porém com sua saída aberta para o ambiente. O resultado final do aparato físico pode ser verificado na Figura 28.

Por fim, todos os esquemáticos dos circuitos utilizados, assim como as PCIs, estão disponíveis no Apêndice A.

Figura 15 – Comando das válvulas e bomba



Fonte: Autoria própria (2024).

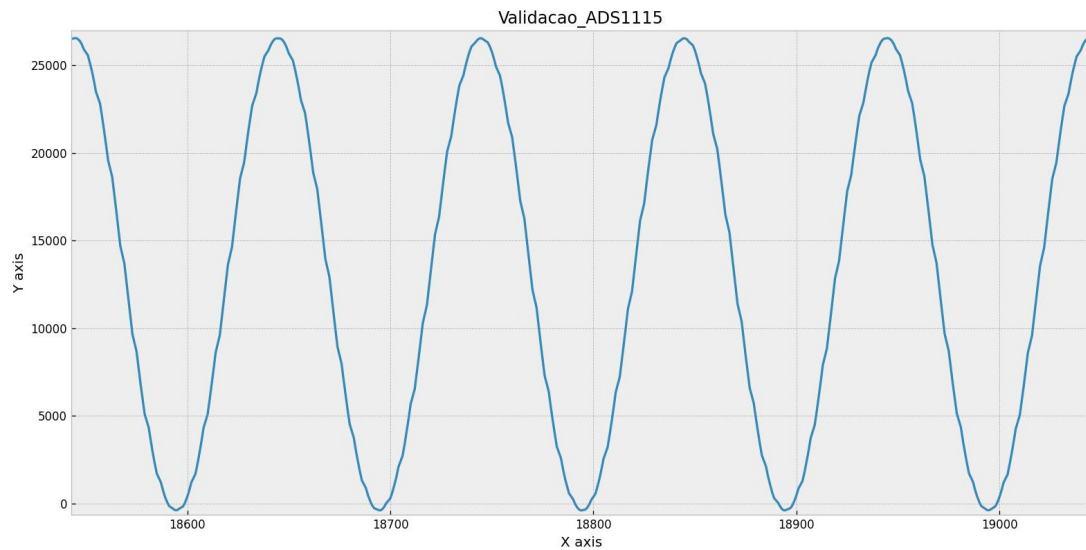
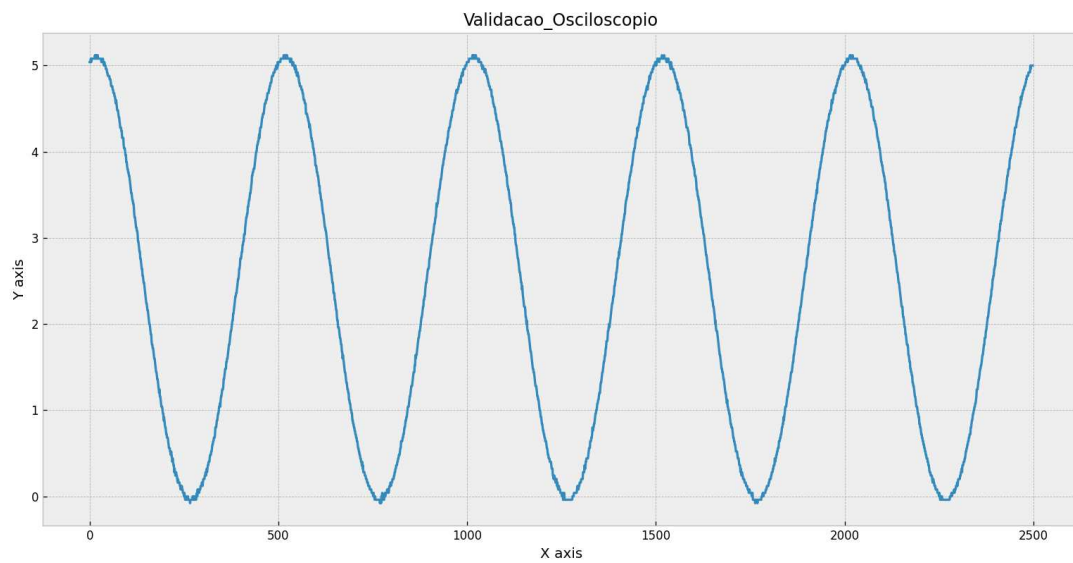
3.2.2.1 Validação do ADS1115

Para poder saber se as medições provenientes do ADS1115 eram confiáveis, foram realizados testes de sincronismo, precisão e exatidão. Tratando-se deste primeiro, verificou-se através de um circuito montado em uma placa de prototipagem, para o correto funcionamento do algoritmo de aquisição de dados.

As entradas do MUX foram conectadas de maneira intercalada em +5V e GND. Considerando que o algoritmo verifica os sinais das entradas em ordem decrescente, esperavam-se dados intercalados entre os fundos de escala do ADC. Os resultados obtidos foram exatamente os esperados, com dados intercalados com os valores máximos e mínimos, validando o correto endereçamento do multiplexador e leitura do conversor analógico-digital.

Para validar sua faixa de resposta e precisão, foi utilizado um gerador de sinais do laboratório, aplicando o sinal diretamente no pino A0 do conversor AD e usando um osciloscópio para validar as leituras. Sendo assim, as Figuras 16a e 16b mostram as leituras feitas por ambos, sendo possível ver a semelhança entre as ondas adquiridas. É importante destacar que, para o teste, foi utilizada uma onda senoidal de 10 Hz com amplitude de 5 V e com *offset* em 2,5 V, tendo algumas pequenas variações devido à inexatidão do gerador de sinais. Além disso, adotou-se uma frequência de amostragem de 200 Hz no ADS1115 para se obter uma boa caracterização do sinal original, sem grandes distorções. Quanto à escolha de um sinal senoidal para a validação, a decisão se deu pela fácil distinção entre uma amostragem correta e uma com ruídos ou não-linearidades, a qual provocaria uma distorção no sinal facilmente perceptível.

Além das capturas e respectivas representações visuais dos arquivos .csv obtidos, salvou-se também uma captura de tela do osciloscópio, onde é possível ver informações importantes, tais como frequência, amplitude e valores mínimos e máximos.

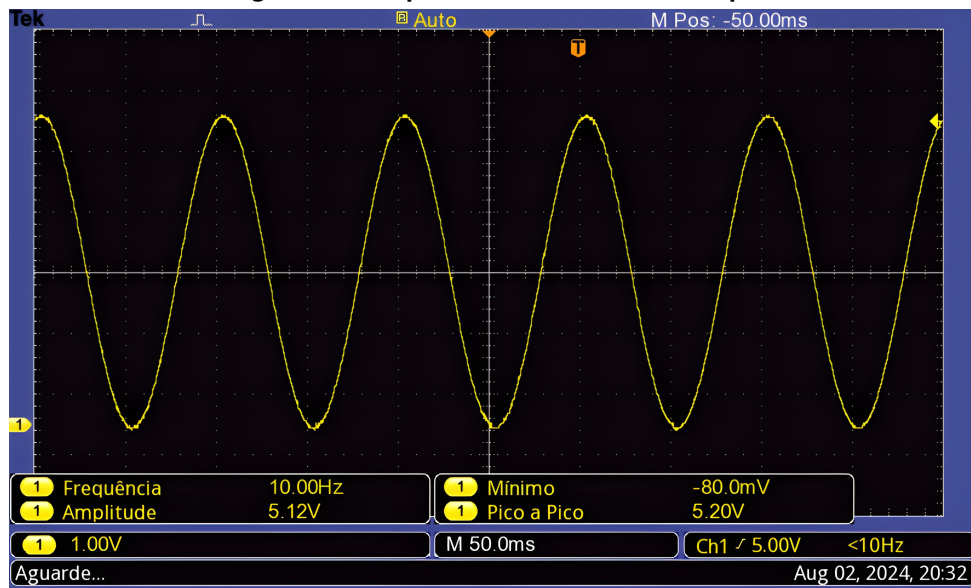
Figura 16 – Validação do ADS1115**(a) Dados coletados pelo ADS1115****(b) Dados coletados pelo osciloscópio**

Fonte: Autoria própria (2024).

3.2.3 IHM

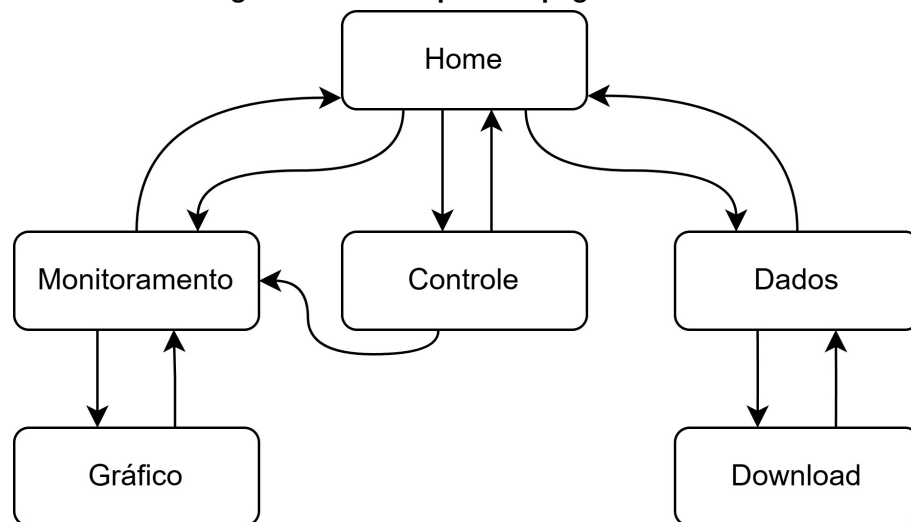
O primeiro passo na concepção da IHM se deu quanto às páginas que a deveriam compô-la e na relação entre elas. Em outros termos, definiu-se quais deveriam ser as funções disponíveis em cada página e como se daria a navegação entre elas, sendo esta mostrada na Figura 18.

Figura 17 – Captura da tela do osciloscópio



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 18 – Hierarquia das páginas da IHM



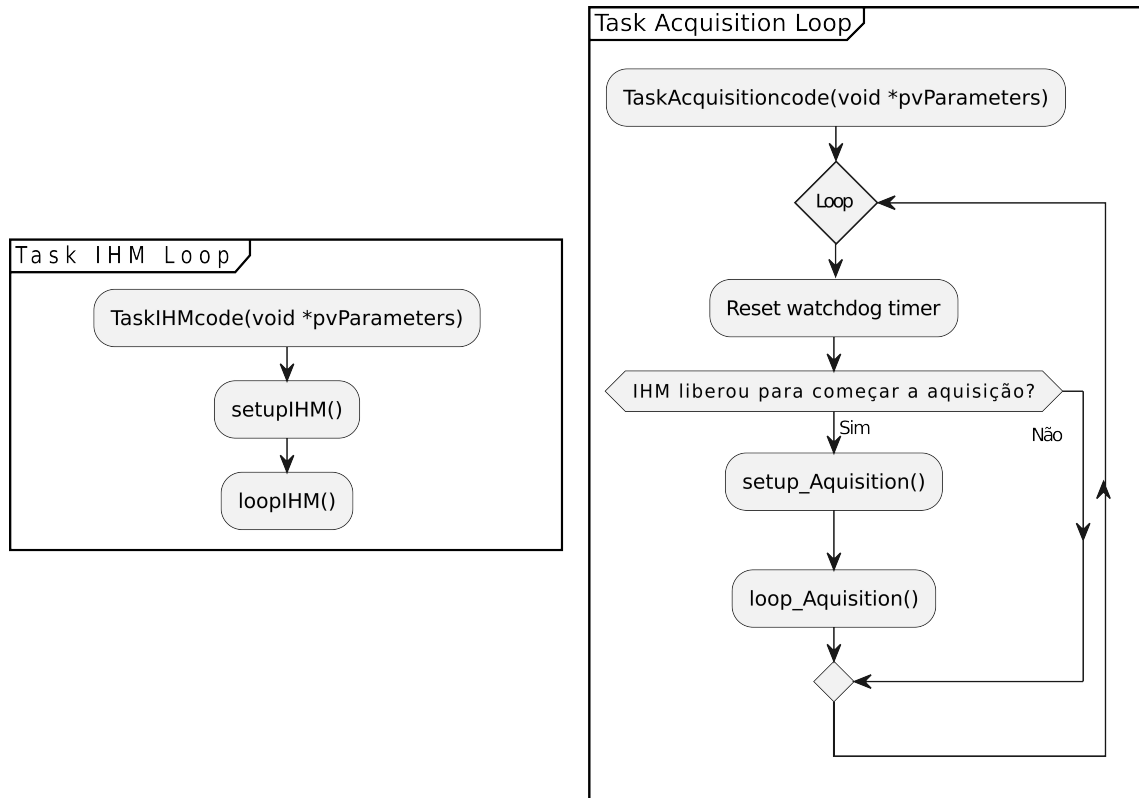
Fonte: Autoria própria (2024).

3.2.3.1 *Tasks* programadas

Dada a intenção de se utilizar ambos os núcleos do ESP32 para o funcionamento do projeto, destinou-se um núcleo para a IHM e controle do projeto e outro para a aquisição dos dados. Para tal, foram criadas duas *tasks*, conforme mostrado na Figura 19. Em seguida, foram escritas as funções *setup* e *loop*, a serem executadas pela função *main*, conforme o padrão do *framework* do Arduino. Logo, ambas as funções estão presentes na Figura 20. Nas figuras mencionadas, é mostrado como são conciliadas as tarefas executadas nos dois núcleos do microcontrolador, sendo o núcleo zero associado à IHM e o um à aquisição dos dados dos sensores. Vale notar a criação de semáforos, sendo de suma importância para que não haja

conflito entre os núcleos, que pode ocorrer quando ambos tentam acessar uma variável ao mesmo tempo. Também foi configurado o *watchdog timer* a fim de evitar problemas com a reinicialização indesejada do sistema, além da inicialização do barramento I²C e Serial, sendo este último utilizado para se monitorar o projeto pelo computador, caso desejado.

Figura 19 – Diagrama das *tasks*



Fonte: Autoria própria (2024).

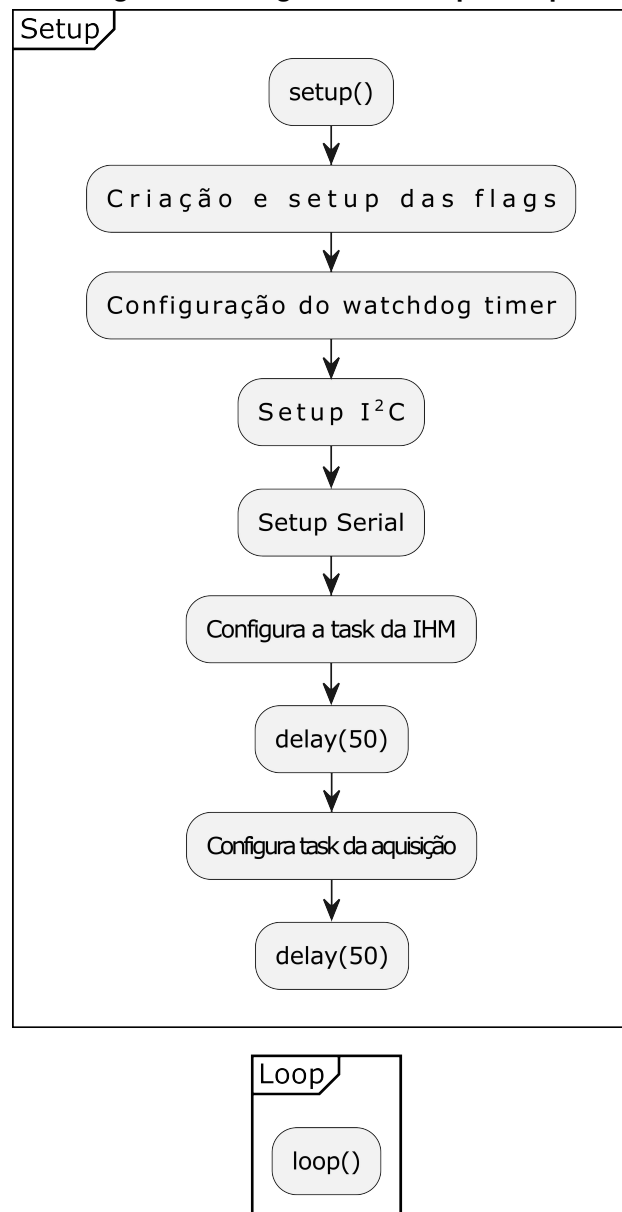
3.2.3.2 Construção da IHM

Antes da confecção do código responsável pela IHM, foi necessário definir qual dispositivo usaríamos para a interação com o usuário. Entre as opções disponíveis, destacam-se: *display* LCD com botões para a navegação; *display touchscreen* com navegação feita por toques na tela; conexão *Wi-Fi offline* via *Access Point* com qualquer dispositivo que possua *Wi-Fi* e navegador disponível, como *tablets*, *smartphones* e computadores.

Assim, após a avaliação dos prós e contras de cada opção, optou-se pela última por apresentar, entre outros benefícios, os seguintes recursos:

- **Conectividade sem fio:** Elimina a necessidade de cabos físicos, aumentando a flexibilidade no design e implantação de sistemas. Como consequência, mais pinos de IO do ESP32 ficam disponíveis para a leitura dos sensores e para outras funcionalidades.

Figura 20 – Diagrama de Setup e Loop



Fonte: Autoria própria (2024).

- **Compatibilidade:** Uma vez que o sistema desenvolvido se utiliza do protocolo HTTP para transmissão de dados, suportado por inúmeros dispositivos com navegadores, é possível utilizar uma ampla gama de aparelhos diferentes, tais como computadores, *smartphones*, *tablets*, além de independer do sistema operacional, funcionando com Android, IOS, Windows, Linux, entre outros.
- **Custo:** Uma consequência direta do tópico anterior é o fato de que, ao se utilizar dispositivos dos usuários para a IHM e o próprio módulo de *Wi-Fi* disponível no microcontrolador, nenhum novo custo com materiais foi necessário. Em contrapartida, caso se optasse pelas outras duas opções citadas, seria necessário se investir em *displays* e/ou botões.

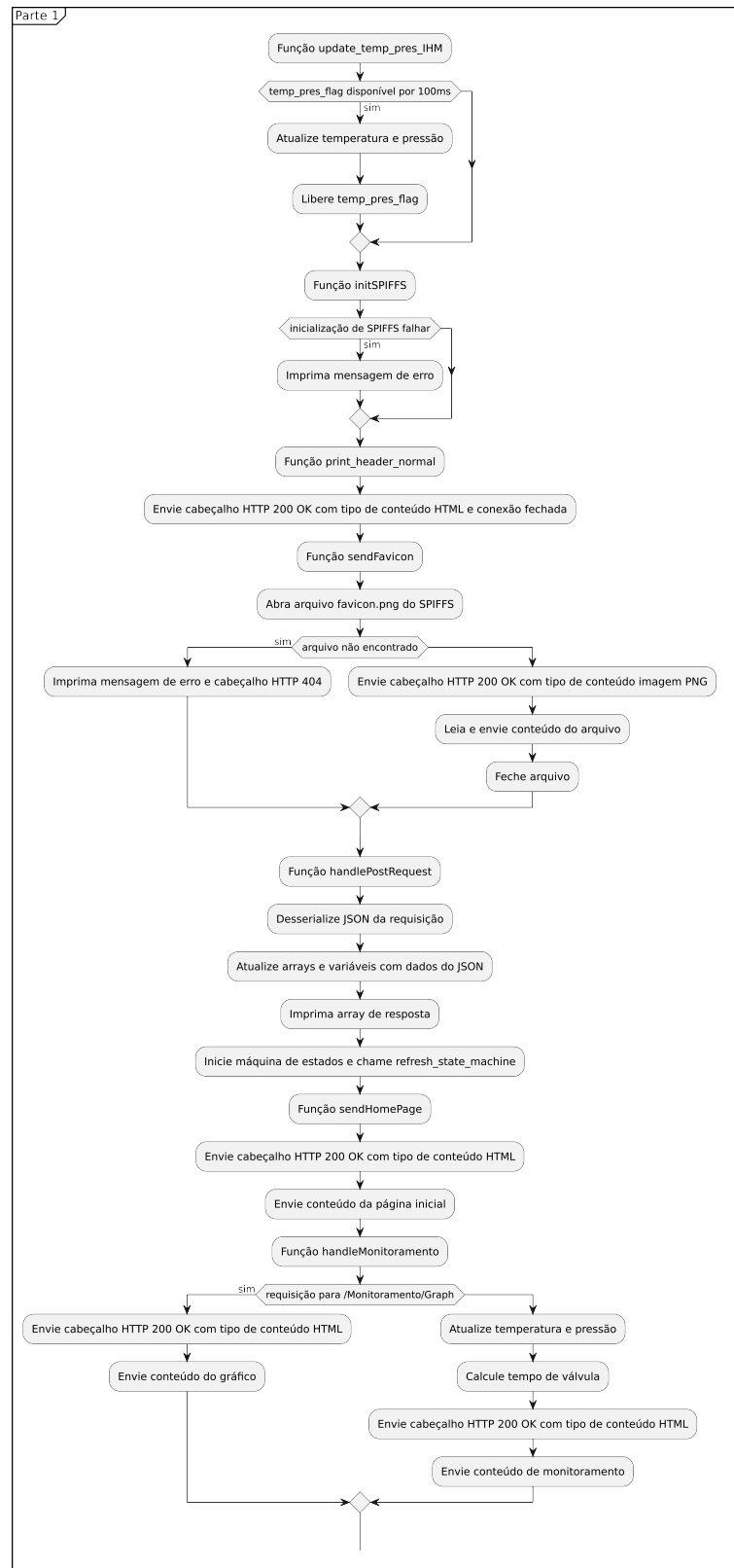
- **Velocidade:** Segundo o *datasheet* disponibilizado pelo fabricante do ESP32 utilizado, o dispositivo em questão suporta uma velocidade de até 150 Mbps, o que é uma velocidade alta dado o baixo custo do microcontrolador. Assim, mesmo que uma interface cabeada pudesse ser mais veloz, ainda assim a velocidade do *Wi-Fi* é grande o suficiente para apresentar bons resultados quando comparado com as demais opções.
- **Segurança:** O suporte a protocolos de segurança robustos ajuda a proteger as comunicações contra interceptações e acessos não autorizados.
- **Flexibilidade e riqueza gráfica:** Dado que a paginação *web* utiliza-se de linguagem HTML, há algumas vantagens associadas à sua utilização, tal como flexibilidade para mudanças e integração com linguagens como JavaScript e CSS. Como consequência, abre-se um grande leque de possibilidades, sobretudo na parte gráfica, já que a estilização via linguagem CSS permite diversas personalizações, tais como fontes, cores, entre outras.

Entretanto, há de se ressaltar que, embora a IHM projetada funcione de maneira *offline*, com o uso de um *Raspberry Pi* em conjunto com o ESP32, é possível conectar o sistema à internet e acessá-lo de qualquer local do mundo que possua conexão à rede (SANTOS; SANTOS, 2024). Porém, pela falta de tempo hábil e pela falta de necessidade intrínseca do recurso para o projeto proposto, tal recurso não foi utilizado, mas apresenta uma opção futura com grande potencial.

3.2.3.3 Diagramas da IHM

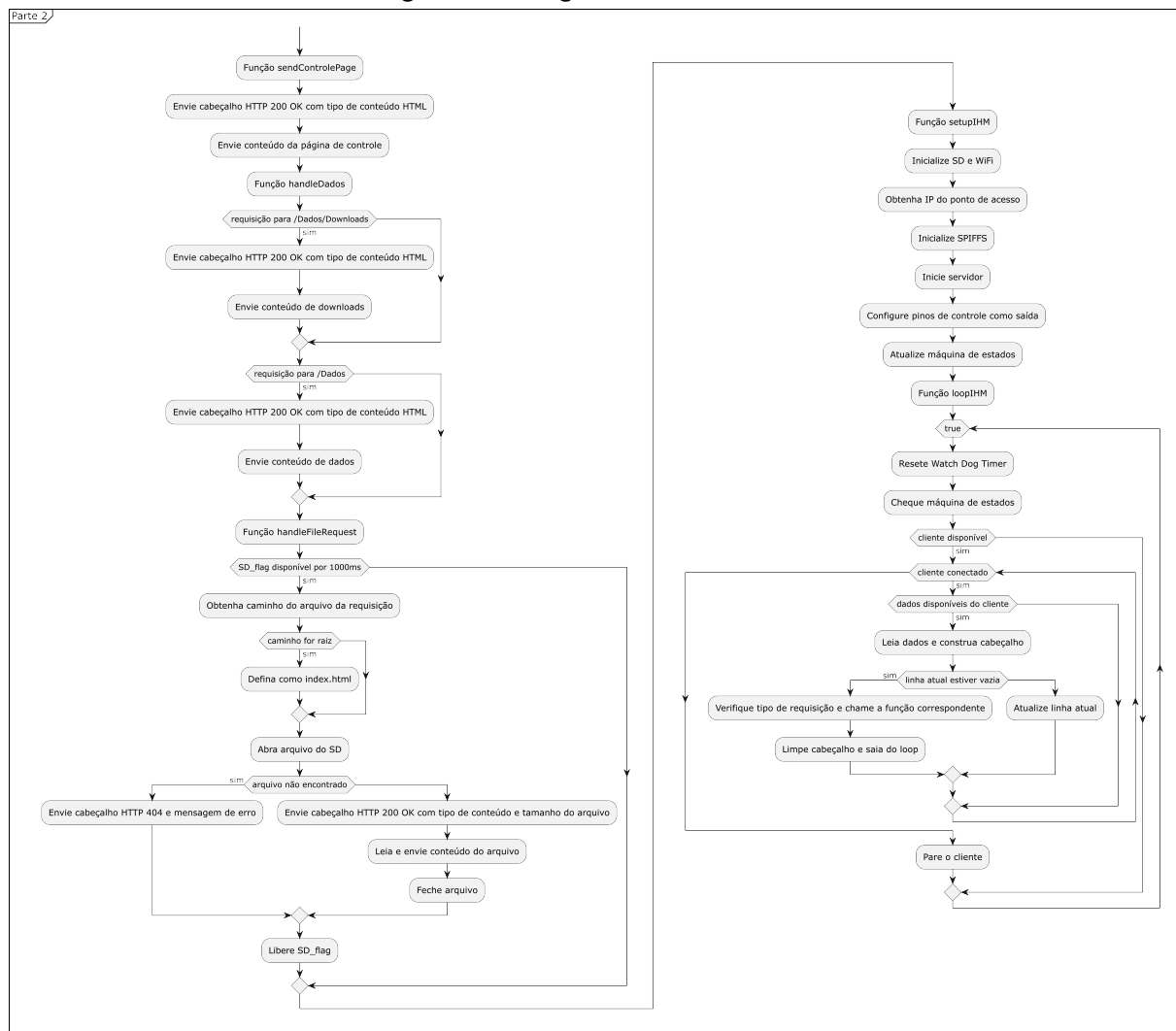
Os diagramas que ilustram o funcionamento da IHM estão descritos nas Figuras 21 e 22. Vale ressaltar que o núcleo do microcontrolador reservado para a *task* da IHM também ficou responsável pelo controle do projeto, definindo todos os principais pontos para o funcionamento do protótipo, tal como quando a aquisição começa e termina, controle do motor e válvulas solenoides, atualização das variáveis da IHM, entre outros. Dessa forma, o funcionamento da máquina de estados está presente nas Figuras 23 e 24, onde estão descritas as funções *check_state_machine* e *refresh_state_machine*, sendo a primeira uma função de verificação rodando no *loop* principal da IHM, e, com isso, checando qual ação deve ser tomada. Assim, caso detecte que os requisitos de um determinado estado foram cumpridos, como requisitos de temporização e pressão, atualiza o valor da variável de estados e fornece tal valor para a função *refresh_state_machine*, que toma decisões conforme o valor recebido.

Figura 21 – Diagrama da IHM - Parte 1



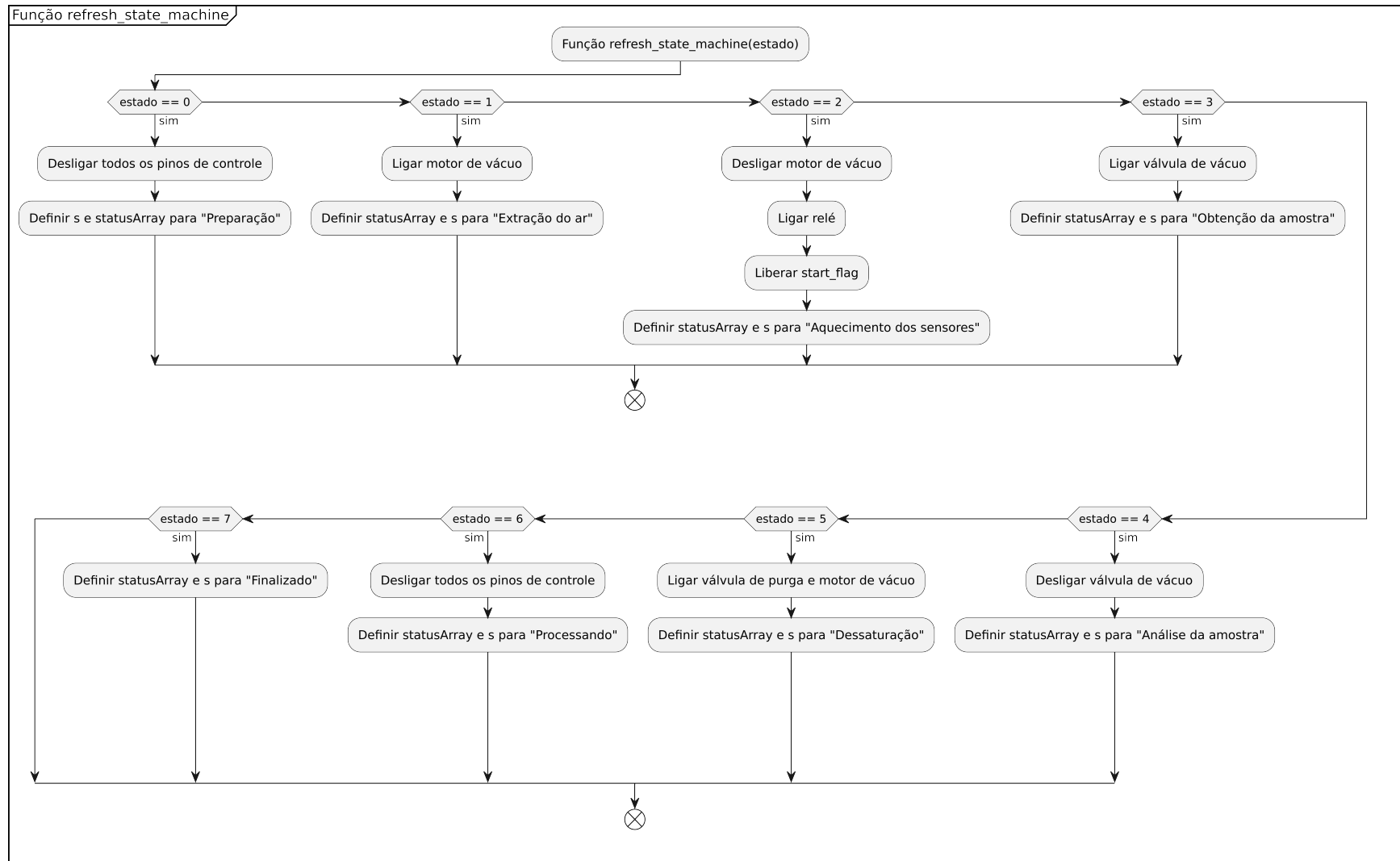
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 22 – Diagrama da IHM - Parte 2



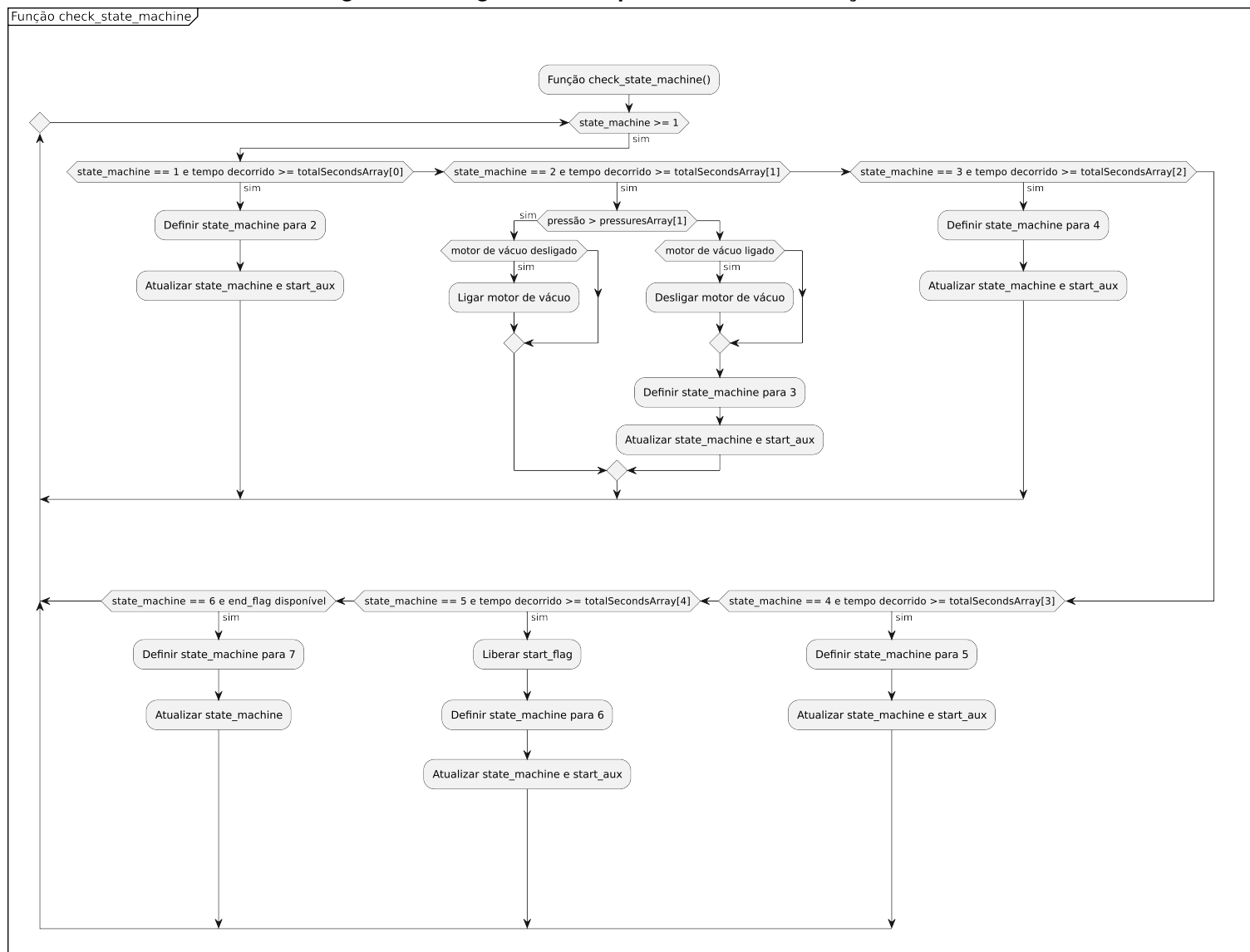
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 23 – Diagrama da máquina de estados - Função *Refresh*



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 24 – Diagrama da máquina de estados - Função *Check*



Fonte: Autoria própria (2024).

3.2.4 Aquisição de Dados

A leitura dos sensores depende do controle realizado pela *task* da IHM. Isto é, ao inicializar o sistema, apenas a placa de controle é alimentada e, assim que o usuário pressiona o botão de iniciar no menu de controle, o relé é acionado, alimentando assim a placa dos sensores e estabelecendo comunicação com os dispositivos a ela conectados. Vale ressaltar que interface entre ambas as placas é feita por meio de oito fios: 4 de endereçamento do multiplexador, 2 do protocolo I²C e dois de alimentação, isto é, um para o *GND* e outro de *V_{CC}*, o qual depende do acionamento do relé. Dito isso, o pseudocódigo do programa responsável pela *task* de leitura está disponível nas Figuras 25 e 26. É importante observar no código que a *task* de leitura dos sensores também é responsável pela criação do arquivo ".txt" no cartão microSD, armazenando os dados a cada nova leitura por meio da anexação de novas linhas com as informações lidas dos sensores. Apesar de interessante a ideia de armazenar os dados em apenas uma variável sem a sobrescrever, há a limitação do tamanho da *string* gerada, impossibilitando assim que haja uma variável com os dados de todas as leituras.

3.2.4.1 Dados

Um ponto importante a se atentar durante a criação do protótipo é o formato em que os dados são salvos. Ou seja, para que sejam gravados e lidos eficientemente, é necessário que sigam uma formatação padrão para todas as leituras, facilitando assim o pós-tratamento dos dados. Dito isso, optou-se por salvar todos os arquivos em formato ".txt", dada a facilidade com a qual o ESP32 consegue abrir e escrever nos arquivos do cartão conectado ao módulo de microSD. Dito isso, o próximo passo foi definir o cabeçalho e a separação dos dados de uma mesma coleta por meio de vírgulas e por quebra de linha para cada nova leitura. Assim, a formatação escolhida é mostrada na Figura 27. Nela, é possível notar que o nome do arquivo usado no exemplo é Etanol_100_18.06.24_18.27.19.txt, sendo que Etanol_100 foi o nome escolhido pelo usuário. Os demais caracteres mostram o horário e a data em que se deu a coleta.

Quanto à entrega dos dados ao usuário, pode ser feita de duas formas. A primeira consiste em baixar o arquivo desejado por meio da página de *downloads*. A segunda consiste em retirar fisicamente o cartão microSD do protótipo e conectá-lo ao dispositivo desejado, como um *notebook*, por exemplo. Após a obtenção do arquivo, o usuário pode trabalhar os dados da forma que desejar. Caso opte por utilizar o *plotter* desenvolvido pela equipe, é necessário transformar o arquivo de ".txt" para ".csv". O processo pode ser feito de diversas formas, sendo o simples renomeio do nome do arquivo uma solução simples e rápida. Outra sugestão é utilizar algum conversor *online* de arquivos disponível na *internet*.

3.2.5 Metodologia de coleta

Para a coleta dos dados experimentais, escreveu-se um código responsável pela leitura sequencial dos sensores, baseado no endereçamento do MUX e leitura dos dados via I²C. O pseudocódigo do algoritmo desenvolvido está disponível nas Figuras 25 e 26. Com o código pronto, foi realizada uma revisão da literatura em busca de parâmetros que otimizassem o projeto, tais como frequência de aquisição e tempos das etapas. Quanto à frequência de coleta, a literatura se mostrou bastante diversificada. Como exemplo, Affognon *et al.* (2023) trabalhou com uma frequência de aquisição de 0,2 Hz, enquanto Chen *et al.* (2024b) trabalhou com 20 Hz, com ambos os estudos alcançando resultados satisfatórios. Outros trabalhos, como Muniz *et al.* (2024) e Kumar *et al.* (2023), utilizaram frequências de 10 e 15 Hz, respectivamente. Dessa forma, após testarmos diferentes valores de frequência de amostragem, optou-se pelo valor de 10 Hz, gerando uma quantidade satisfatória de dados que caracterizam bem as curvas dos sensores.

Quanto às etapas de operação, definiram-se cinco principais, sendo elas:

- **Extração de ar:** acionamento da bomba para a retirada de ar de dentro do pote, de forma a criar um vácuo parcial inicial;
- **Aquecimento dos sensores:** tempo no qual os sensores serão aquecidos antes do recebimento da amostra. Vale ressaltar que, ao fim do tempo definido pelo usuário para essa etapa, a pressão lida pelo BME280 será comparada com o valor mínimo de pressão definido pelo usuário. Assim, caso tal condição não seja satisfeita, a bomba será ligada novamente, de forma a obter uma pressão menor ou igual à definida pelo usuário. Uma vez que a pressão alvo seja atingida, a bomba é desligada e passa-se para a próxima etapa;
- **Obtenção da amostra:** após se aquecer os sensores e se atingir a pressão desejada, a válvula solenoide da amostra é ligada, permitindo assim que os CVs presentes no kitassato sejam conduzidos para o interior do pote hermético. Após o tempo de obtenção definido pelo usuário, a válvula solenoide é desligada;
- **Tempo de análise:** período no qual os compostos voláteis presentes no pote hermético são analisados pelos sensores, sendo que os dados são coletados e armazenados;
- **Dessaturação:** por fim, a válvula solenoide de dessaturação é ligada em conjunto com o motor, substituindo o ar do interior da câmara pelo ar atmosférico.

Embora os tempos das etapas sejam definidos pelo usuário por meio da IHM, para as aquisições dos dados que aqui serão apresentados ao decorrer do Capítulo 4 fez-se uma busca na literatura por tempos otimizados que possibilitassem tanto bons resultados como o

menor tempo possível, garantindo assim uma coleta com dados confiáveis e suficientes para a posterior classificação dos dados, mas, ao mesmo tempo, operando no menor tempo possível.

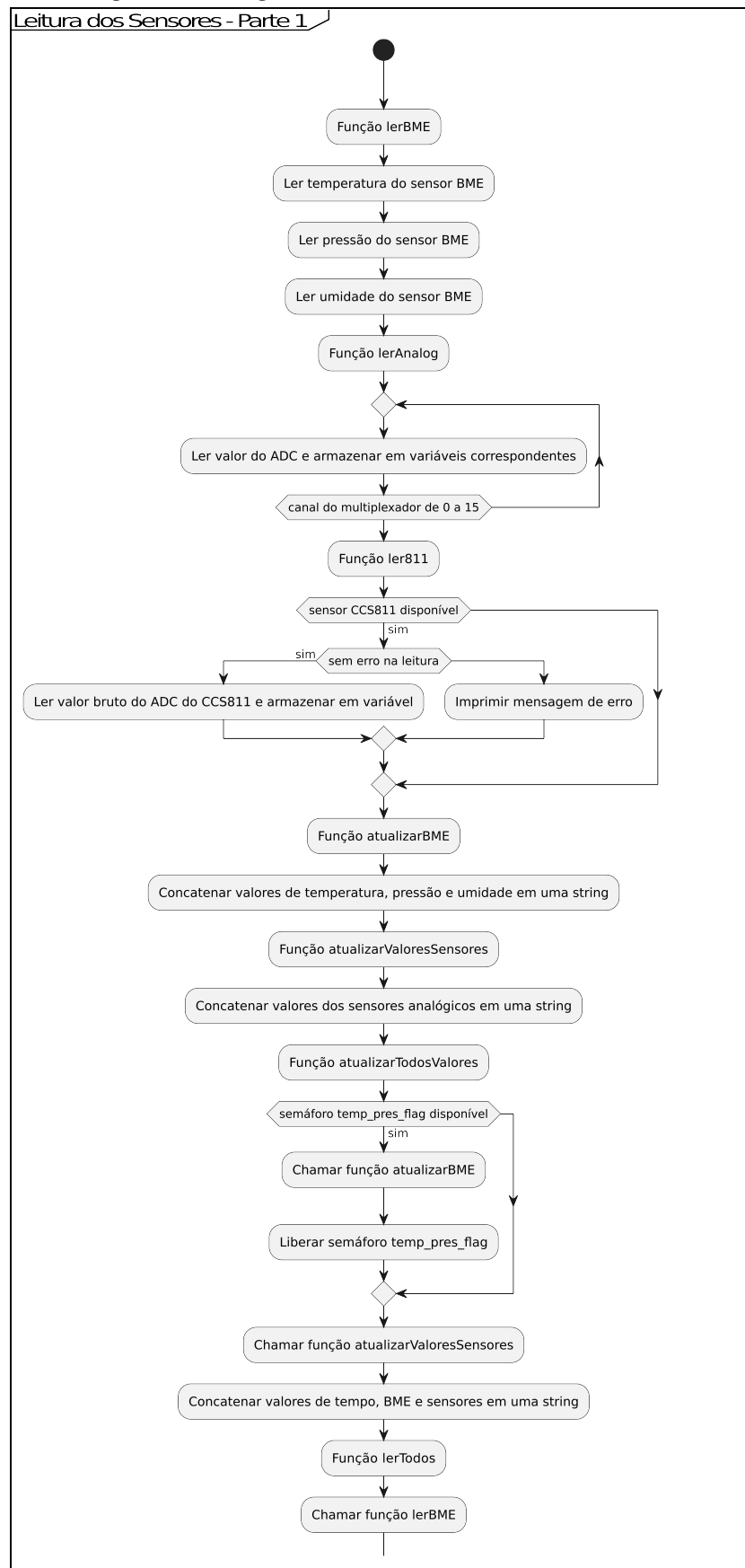
Chen *et al.* (2024b) sugeriu uma ventilação inicial de 50 segundos para uma limpeza da câmara a vácuo. No entanto, outros autores, como Wakhid, Sarno e Sabilla (2022), não fizeram nenhuma ventilação inicial para a limpeza para a câmara. Logo, para a etapa inicial de extração de ar, foi utilizado o tempo de apenas 1 segundo, tempo esse apenas simbólico, a fim de que a IHM pule a etapa. De qualquer forma, a limpeza da câmara é feita posteriormente ao se extrair o ar da câmara a fim de atingir a pressão alvo.

Já a etapa de aquecimento dos sensores se trata de um ponto crítico, sendo que os fabricantes recomendam de 24 a 48h de aquecimento prévio, a depender do sensor utilizado. No entanto, por se tratar de um tempo ineficaz, uma vez que é demasiadamente longo, buscou-se por artigos na literatura por trabalhos que conseguiram com êxito utilizar tempos menores. De fato, descobriu-se que autores como Hasan, Sarno e Sabila (2020) e Wakhid, Sarno e Sabilla (2022) aqueceram os sensores por apenas 5 minutos e mesmo assim obtiveram resultados satisfatórios. Sendo assim, optamos pelo mesmo período para nossas coletas.

Já as etapas de obtenção da amostra e tempo de análise são, comumente, consideradas como apenas uma na literatura. Logo, embora as nomenclaturas do nosso trabalho difira dos demais, em termos práticos, são quase idênticos. Isto é, durante ambas as etapas, a amostra estará sob análise, mas visto que após as pressões no interior do kitassato e do dispenser se igualarem alguns segundos após a abertura da válvula, notou-se que a manter aberta é desnecessário, optando-se, pois, por desligá-la após certo tempo, isolando ambos os compartimentos. Kumar *et al.* (2023) e Affognon *et al.* (2023) analisaram a amostra durante 20 minutos, enquanto Hasan, Sarno e Sabila (2020) adotaram tempos variáveis de 10 a 15 minutos. Já outros autores, como Chen *et al.* (2024b) e Wakhid, Sarno e Sabilla (2022) analisaram as amostras por 200 e 120 segundos, respectivamente. Levando tais valores em consideração, optou-se por 1 e 5 minutos como tempos de obtenção da amostra e sua análise, respectivamente, totalizando 6 minutos de análise efetiva da amostra.

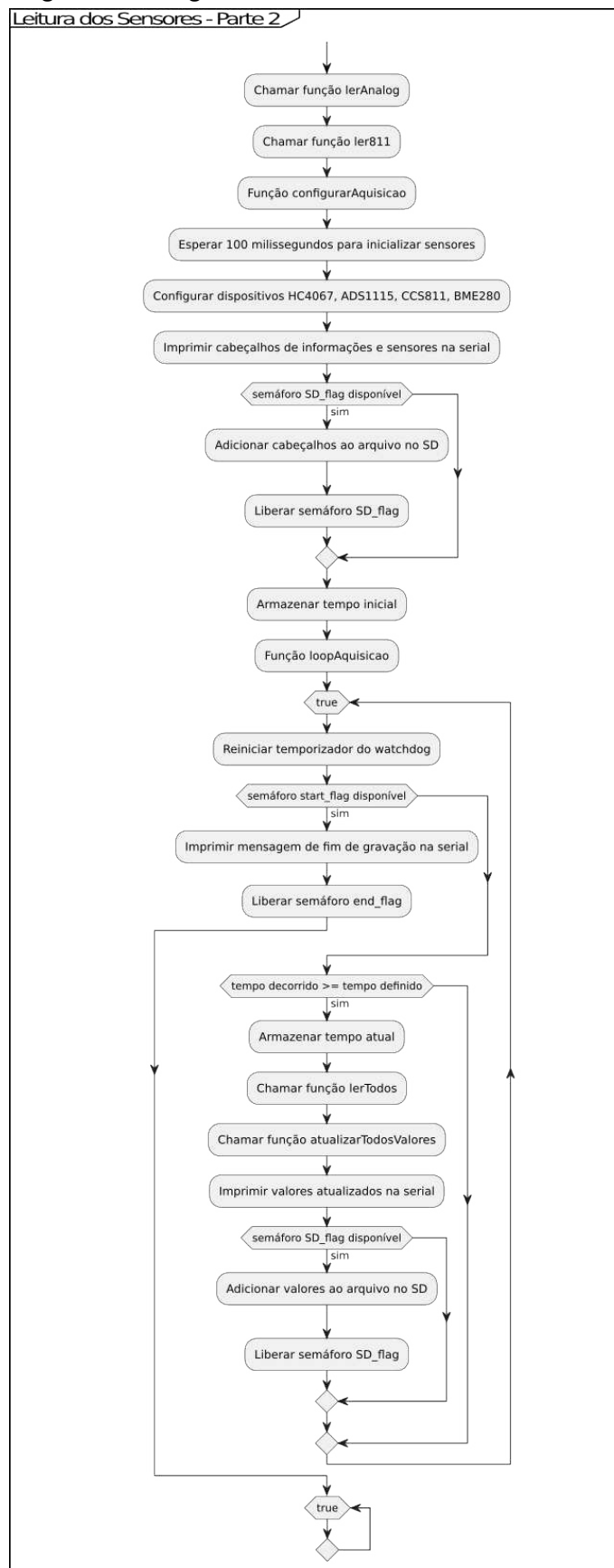
Por fim, foi necessário definir o tempo da última etapa, sendo ela a de dessaturação. Na literatura, tem-se que Kumar *et al.* (2023), Affognon *et al.* (2023), Hasan, Sarno e Sabila (2020) e Wakhid, Sarno e Sabilla (2022) estipularam tempos de 1200, 600, 300 e 60 segundos. Logo, optou-se por dessaturar a câmara por 300 segundos.

Figura 25 – Diagrama da leitura dos sensores Parte 1



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 26 – Diagrama da leitura dos sensores Parte 2



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 27 – Visualização do arquivo bruto dos dados coletados

The image shows a text editor window with the file name 'Etanol_100_18.06.24_18.27.19.txt'. The editor displays a large table of data with 25 columns. The first row is the header, and the subsequent rows contain numerical data. Red arrows point to the file name, the header row, and the data rows.

Temp.	Pres.	Hum.	MQ2	MQ3	MQ4	MQ5	MQ6	MQ7	MQ8	MQ9	MQ135	MQ137	MQ138	TGS822	TGS2600	TGS2602	TGS2603	CO	NH3	NO2	MS11	V_ref
0.28	25.69	31.92	33.97	10176	10105	13792	2624	14014	18236	6520	16081	22484	16008	9049	473	18339	19766	14495	1337	456	429	0.23082
0.58	25.71	31.99	34.00	11626	11491	14587	3138	14619	18587	7136	16704	22571	16792	10385	515	20428	20389	15643	1456	456	428	0.23115
0.89	25.74	32.07	34.03	13572	12791	15532	3836	15263	18866	7761	17385	22579	17456	11666	572	21659	20800	16638	1591	454	428	0.23118
1.20	25.75	32.16	34.09	15438	13967	16569	4778	16023	19151	8408	18136	22613	17954	12708	654	22287	21103	17489	1708	454	427	0.23141
1.66	25.76	32.26	34.15	16933	15459	17840	6553	17254	19534	9344	19028	22627	18430	13803	827	22607	21331	18436	1887	453	426	0.23046
1.98	25.77	32.36	34.21	17267	16166	18244	7731	17942	19627	9874	19315	22497	18562	14286	987	22545	21374	18923	2079	452	425	0.22962
2.29	25.78	32.43	34.29	17585	16865	18572	8799	18611	19799	10398	19608	22473	18740	14747	1200	22575	21496	19443	2195	451	425	0.22976
2.73	25.79	32.52	34.36	18060	17799	19029	10158	19387	20125	11110	20068	22565	19064	15421	1638	22656	21656	20125	2280	450	424	0.23001
3.05	25.79	32.61	34.44	18342	18307	19266	10966	19736	20308	11536	20350	22633	19289	15898	2070	22705	21785	20599	2326	449	425	0.23072
3.36	25.78	32.68	34.51	18580	18708	19451	11674	19951	20431	11869	20528	22609	19419	16314	2627	22662	21783	20910	2424	449	423	0.23027
3.67	25.79	32.76	34.57	18746	18995	19573	12272	20083	20503	12142	20678	22582	19564	16708	3357	22630	21793	21172	2514	448	423	0.22986
3.98	25.80	32.82	34.63	18924	19244	19711	12827	20193	20573	12372	20819	22535	19701	17037	4296	22574	21780	21380	2617	447	422	0.22943
4.29	25.81	32.89	34.70	19068	19408	19823	13312	20279	20652	12565	20960	22525	19839	17323	5454	22542	21772	21542	2693	446	421	0.22925
4.60	25.81	32.98	34.79	19280	19581	19988	13804	20406	20770	12756	21143	22613	20038	17603	6853	22616	21896	21805	2688	446	423	0.23047
4.91	25.82	33.05	34.83	19626	19840	20271	14356	20599	20947	12952	21347	22678	20190	17761	8417	22622	21904	21913	2714	445	422	0.23028
5.23	25.82	33.12	34.89	19845	19885	20357	14783	20591	20954	13034	21451	22668	20271	17806	10077	22644	21944	22026	2744	445	422	0.23077
5.54	25.83	33.18	34.95	20071	19995	20536	15271	20708	21043	13129	21542	22648	20294	17730	11635	22584	21898	22027	2824	444	421	0.23026
5.85	25.83	33.27	35.04	20304	20060	20653	15717	20748	21055	13169	21573	22607	20253	17622	13032	22520	21862	22034	2910	443	420	0.22987
6.16	25.84	33.34	35.08	20496	20107	20745	16160	20797	21078	13217	21588	22575	20158	17516	14221	22473	21811	22016	2979	443	419	0.22914
6.47	25.84	33.40	35.14	20647	20084	20684	16536	20786	21000	13193	21490	22449	19949	17321	15099	22336	21704	21954	3136	442	419	0.22828
6.78	25.84	33.47	35.19	20705	20088	20630	16898	20794	20972	13176	21415	22369	19812	17231	15820	22259	21644	21904	3229	441	417	0.22774
7.09	25.84	33.55	35.25	20891	20195	20527	17312	20960	21074	13255	21523	22498	19863	17270	16437	22324	21715	21984	3184	441	417	0.22860
7.40	25.85	33.64	35.32	20651	20224	20310	17584	21040	21063	13263	21517	22503	19789	17217	16906	22380	21770	22043	3177	441	418	0.22915
7.73	25.85	33.70	35.38	20002	20315	20133	17662	21092	21005	13243	21501	22536	19789	17261	17262	22398	21779	22048	3173	441	419	0.22908
8.04	25.86	33.77	35.43	19665	20351	20136	17726	21281	21079	13289	21546	22541	19713	17230	17467	22397	21794	22079	3202	440	418	0.22956
8.35	25.86	33.83	35.48	19516	20392	20085	17665	21369	21064	13275	21537	22553	19675	17212	17619	22377	21783	22055	3222	440	418	0.22952
8.66	25.86	33.89	35.55	19433	20460	20064	17569	21491	21085	13281	21570	22591	19660	17228	17740	22415	21812	22082	3212	439	418	0.22990
8.97	25.87	33.98	35.60	19294	20469	19973	17407	21523	21033	13234	21524	22555	19581	17183	17734	22362	21738	21998	3281	439	417	0.22921
9.28	25.87	34.05	35.65	19118	20385	19819	17213	21461	20880	13119	21388	22422	19416	17058	17624	22212	21602	21861	3435	438	416	0.22797

Fonte: Autoria própria (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados preliminares, decorrentes das etapas de validação da primeira iteração do protótipo. Foram selecionados compostos para os quais já se conhece quais sensores devem ou não variar suas respostas.

4.1 Protótipo

O protótipo final obtido é mostrado na Figura 28. Na figura, é mostrada a versão final do protótipo, que foi utilizada para as coletas realizadas. No entanto, vale ressaltar que, embora na imagem o kitassato esteja aberto, ele deve ser vedado antes da realização de cada coleta. Tal vedação foi alcançada ao se acoplar uma bexiga de látex em seu bocal, solução esta que se mostrou simples, eficaz e de baixo custo, podendo ser trocada com facilidade.

Figura 28 – Protótipo completo explicado - Vista superior



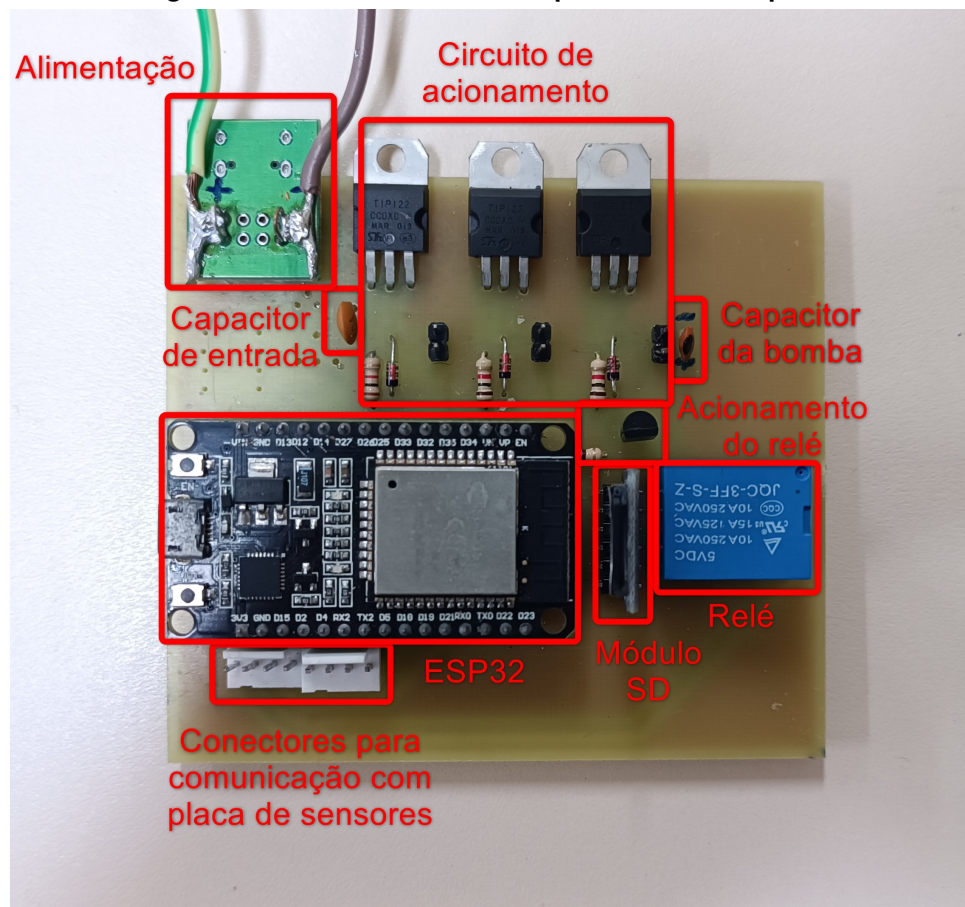
Fonte: Autoria própria (2024).

Para uma melhor visualização das placas de controle e de sensores, foram tiradas fotografias em perspectiva, sendo elas mostradas nas Figuras 31 e 32.

4.2 IHM

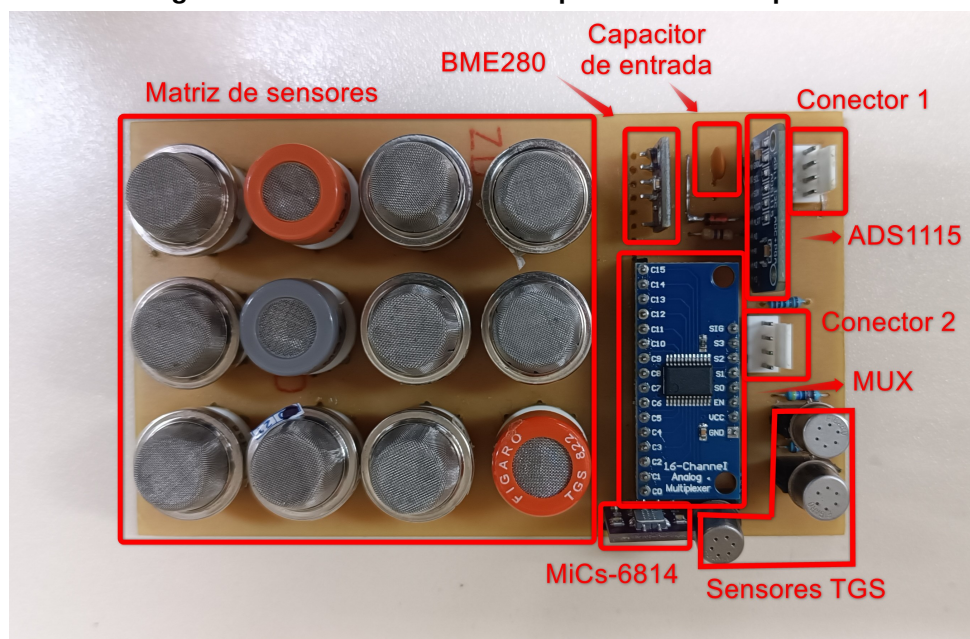
O objetivo da atual subseção é apresentar um exemplo de uso da IHM, mostrando desde a conexão à rede AP até as páginas que compõem a interface. Ademais, vale notar que para as figuras aqui apresentadas, foi utilizado um dispositivo Android de modelo Samsung Galaxy

Figura 29 – Placa de comando explicada - Vista superior



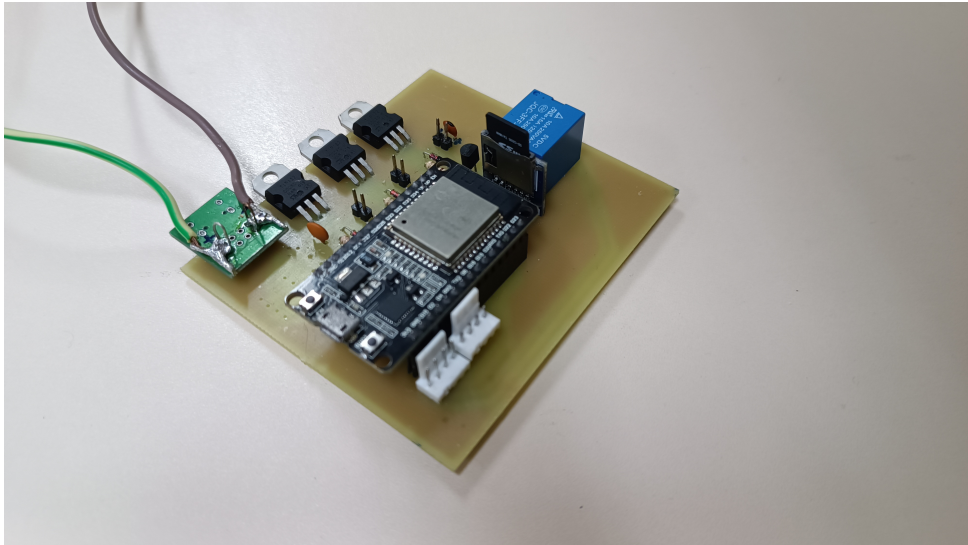
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 30 – Placa de sensores explicada - Vista superior



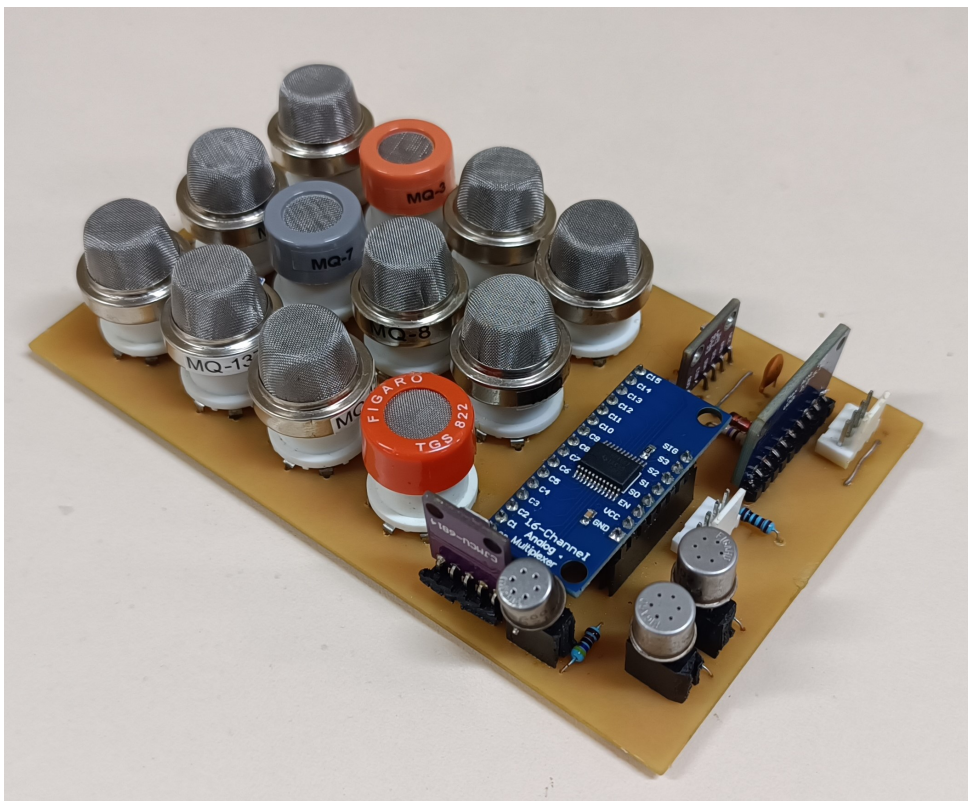
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 31 – Placa de comando - Vista em perspectiva



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 32 – Placa de sensores - Vista em perspectiva



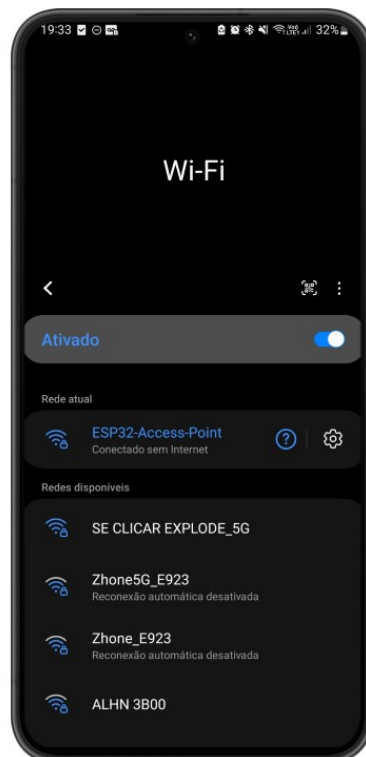
Fonte: Autoria própria (2024).

S22 para a navegação, sendo feitas capturas de tela usando o próprio dispositivo. Dito isso, a Figura 33 mostra a conexão via *Wi-Fi*.

Quanto às configurações da rede em questão, o nome e a senha foram definidos como ESP32-Access-Point e 123456789, respectivamente. Vale ressaltar que ambas podem ser mudadas facilmente no código principal da IHM, podendo inclusive se tornar uma rede aberta. No

entanto, optou-se pela senha em questão para que não houvesse interferência de usuários externos mal-intencionados e, ao mesmo tempo, simples o suficiente para conexão de qualquer novo aparelho que deseje utilizar a IHM.

Figura 33 – Acesso à rede AP do ESP32



Fonte: Autoria própria (2024).

Na sequência, após estar conectado à rede AP, basta abrir o navegador de preferência, inserir o endereço de IP 192.168.1.1 e pressionar o ícone de *Enter*. Com isso, o dispositivo envia uma requisição HTTP para o ESP32, que a processa conforme a lógica mostrada nos Algoritmos 21 e 22 e retorna uma *string* contendo toda a diagramação da página. Nela, é apresentado o título TCC - eNose, seguido do subtítulo UTFPR - PG e três botões, responsáveis para redirecionar o usuário para a página desejada. O resultado pode ser visto na Figura 34.

Caso o usuário opte pelo primeiro botão, será direcionado para a página Monitoramento, representada na Figura 35a. Nela, há três subtópicos: Válvulas, Bomba e Informações Operacionais. Em Válvulas, são mostrados os *status* de cada uma das três válvulas, sendo que as duas primeiras são duais: isto é, representam os terminais NC e NO da válvula solenoide de três caminhos, e a última representa a válvula solenoide de dois caminhos. Já em Bomba, é apresentado o *status* da bomba responsável por retirar o ar da câmara dos sensores. Por fim, em Informações Operacionais, são apresentadas quatro informações: Temperatura, Pressão, Tempo de Operação e Etapa de Operação. Para os dados de umidade, pressão e temperatura, são usados os dados provenientes do sensor BME 280. Já o tempo de operação pode ser contabilizado de duas formas: inicialmente, o tempo é definido com base no tempo decorrido desde a alimentação do microcontrolador e sua respectiva inicialização; todavia, após o botão Iniciar

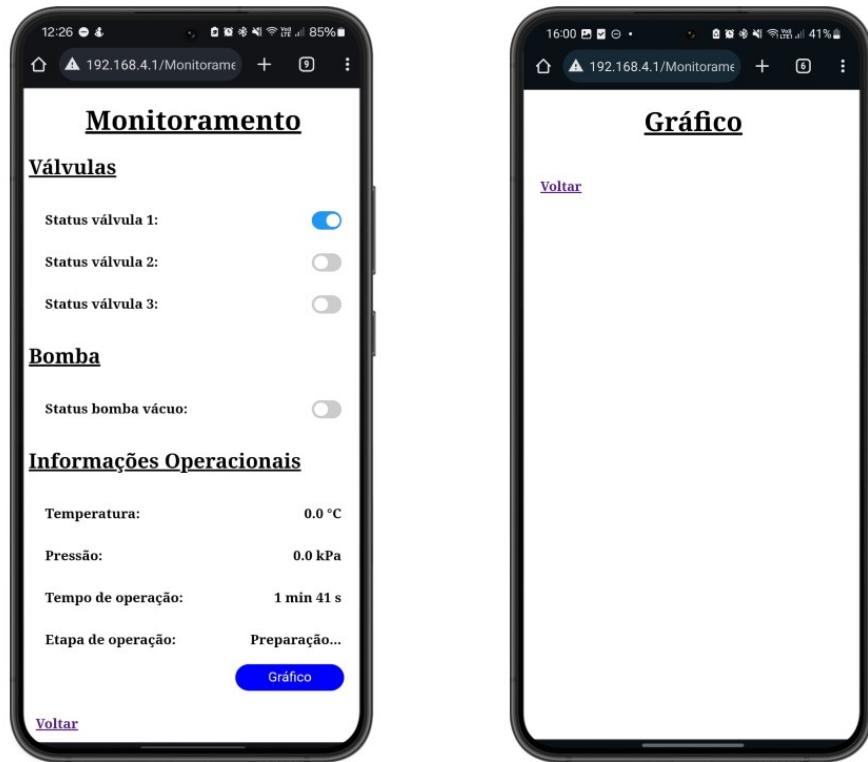
Figura 34 – Página principal da interface



Fonte: Autoria própria (2024).

da página Controle ser pressionado, o *timer* é redefinido de forma a contabilizar apenas o tempo decorrido desde o início da coleta de dados. Já a etapa de operação é definida consoante os oito estágios da máquina de estados, podendo assumir os valores Preparação..., Extração do ar, Aquecimento dos sensores, Obtenção da amostra, Análise da amostra, Dessaturação, Processando... e Finalizado. Logo abaixo da etapa de operação, há o botão Gráfico, que redireciona o usuário para a página Gráfico, mostrada na Figura 35b. No entanto, uma vez que volume de sensores e dados por eles recebidos é considerável, a implementação de um gráfico em tempo real se tornou um desafio considerável e, devido à falta de tempo hábil e complexidade em se exibir os dados de forma satisfatória, optou-se pela criação da página como *placeholder* para trabalhos futuros. Por outro lado, a partir de códigos *open-source* disponíveis no *GitHub*, escreveu-se um código em *Python* responsável pela visualização dos dados em formato *.csv* disponíveis para download na IHM. Após a escrita do código, utilizou-se da ferramenta *auto-py-to-exe 2.44.0* para transformar o código em um arquivo executável do tipo *.exe*, que pode ser executado em qualquer computador com plataforma Windows. Os detalhes do programa estão detalhados na Figura 36a, assim como um exemplo de seu funcionamento é mostrado nas Figuras 36b e 37. Vale salientar que a Figura 37 procura mostrar o *plotter* desenvolvido e, portanto, as curvas mostradas são apenas para exemplificação. Por fim, ao final das páginas de Monitoramento e Gráfico, há os *hyperlinks* Voltar, responsáveis por auxiliar na navegação e fazer com que o usuário possa voltar para a página anterior. O mesmo vale para as demais páginas, com exceção da principal.

Figura 35 – Páginas Monitoramento e Gráfico

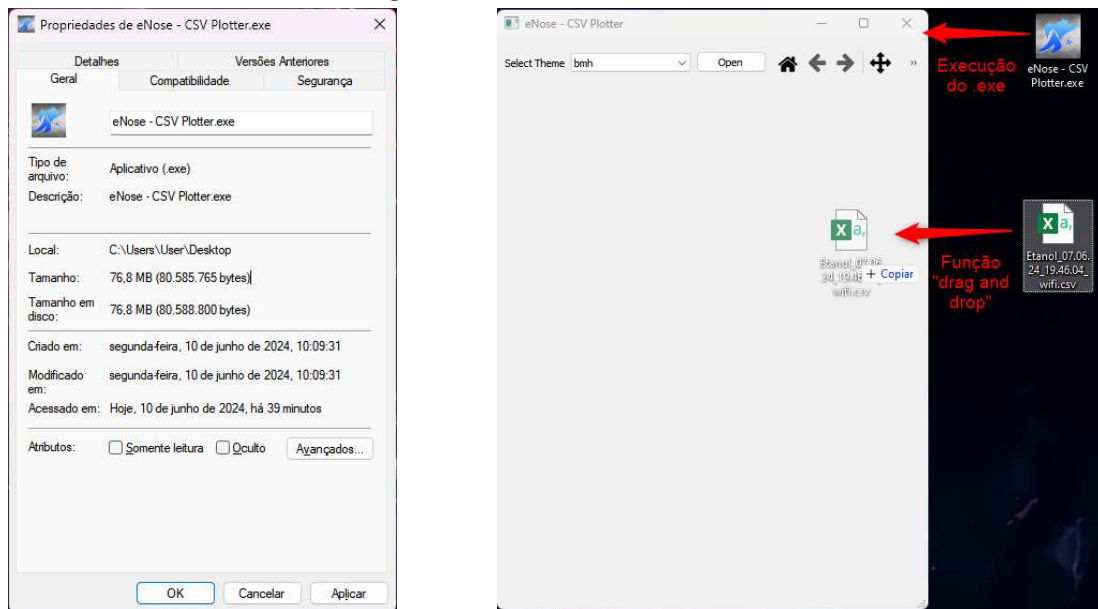


(a) Página de monitoramento

(b) Página para o gráfico

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 36 – *Plotter* desenvolvido

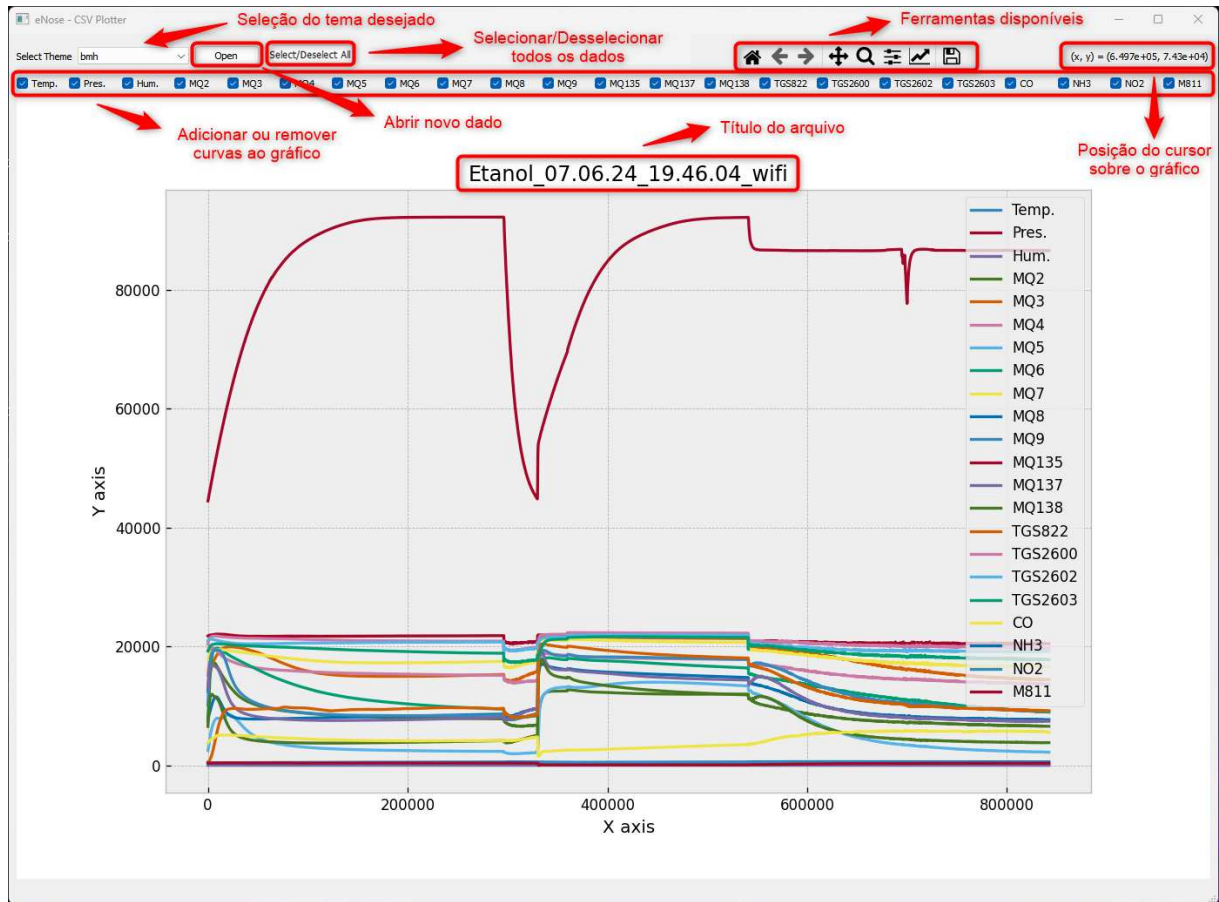


(a) Detalhes do .exe

(b) Carregamento do arquivo .csv

Fonte: Autoria própria (2024).

Ainda em relação à página de monitoramento, o código HTML da página contém um comando que solicita sua atualização a cada segundo, mostrando sempre novas informações

Figura 37 – Exemplo de uso do *plotter*

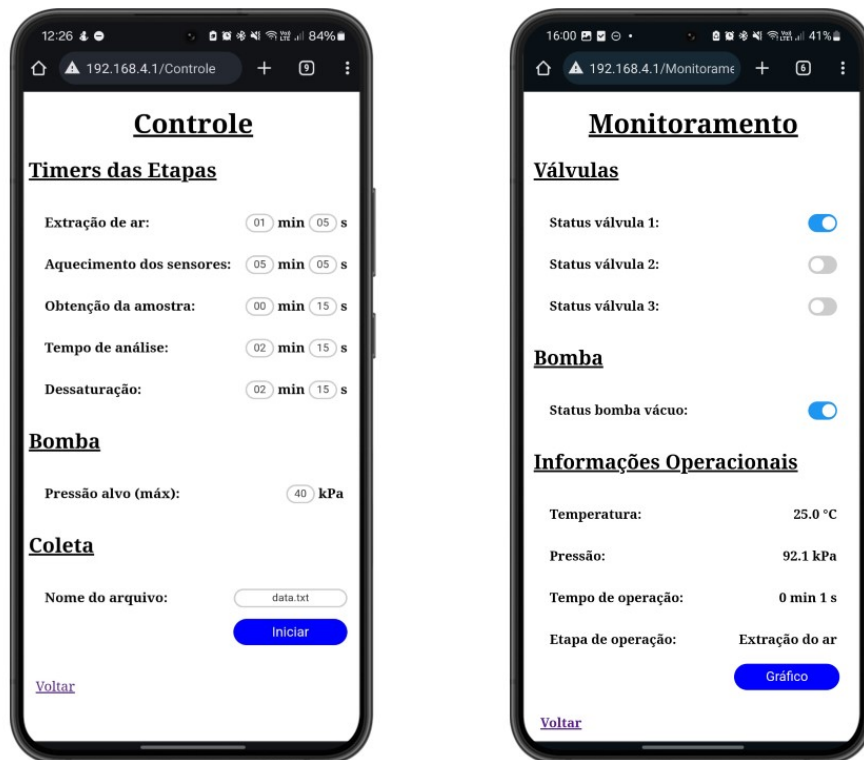
Fonte: Autoria própria (2024).

ao usuário. Além disso, a lógica também foi implementada na página de Dados, mas atualizando a cada 5 segundos. Quanto às demais páginas, por não haver necessidade de atualização constante, foram mantidas estáticas.

A página de controle, mostrada na Figura 38a, é dividida em Timers das Etapas, Bomba e Coleta. Na primeira parte, o usuário pode definir o tempo de cada etapa ao definir os *timers* de minutos e segundos, sendo definidas quatro etapas. Já na parte "bomba", o usuário pode definir a pressão-alvo, isto é, qual o valor de referência ao se extrair o ar da câmara a vácuo, desligando o motor ao atingir a pressão mínima e ligando-a novamente caso assuma um valor maior do que a pressão máxima definida. Por fim, na parte "Coleta", o usuário pode inserir o nome desejado para o arquivo da coleta, podendo ter o tamanho máximo de 18 caracteres, diferentemente dos demais campos da página, que possuem o tamanho máximo de dois caracteres por campo. Outro detalhe importante é que, caso o usuário insira uma *string* que não termine com .txt, foi escrito um código em JavaScript na página para o nome ser corrigido antes de enviado ao microcontrolador. Em seguida, após o usuário ter definido os campos conforme desejado, pode pressionar o botão Iniciar para que se dê início ao ciclo. Nesse momento, duas coisas importantes acontecem: os dados são enviados para o microcontrolador usando o protocolo

HTTP em um arquivo de formato .json; o usuário é redirecionado à página de monitoramento e a máquina de estados é atualizada, restaurando o timer de tempo de execução e executando os passos definidos para a etapa de extração de ar, como ligar a bomba de vácuo. A ação descrita pode ser visualizada na Figura 38b

Figura 38 – Páginas Controle e ação do botão Iniciar
(a) Página de controle **(b) Ação do botão Iniciar**



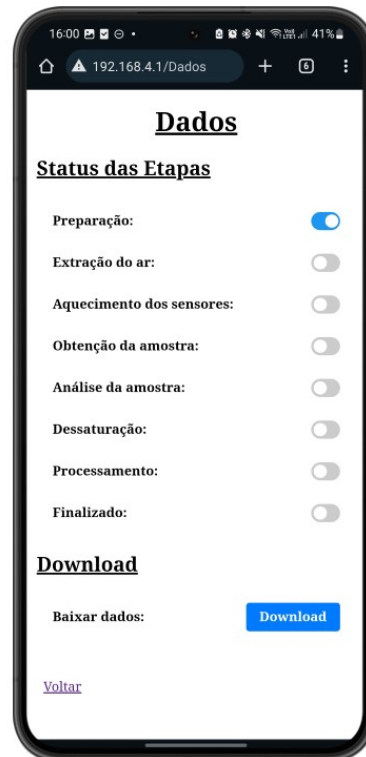
Fonte: Autoria própria (2024).

Já na página de "Dados", mostrada na Figura 39, estão disponíveis tanto o *status* de cada uma das oito etapas como o acesso à página de *downloads* por meio do botão "Download".

Por fim, a última página da IHM é a de "Downloads", acessível pelo botão comentado no parágrafo anterior. Nessa página, o microcontrolador lê quais são os arquivos disponíveis no cartão SD e os disponibilizam para *download*, sendo possível baixar cada arquivo presente no cartão SD individualmente. No caso do exemplo da Figura 40, havia apenas um arquivo com o nome de data_09.05.24_16.00.17.txt, sendo que a página varia conforme os arquivos gravados no microSD.

Vale destacar que, embora cada página seja acessível apenas a partir de outra página, cada uma pode se acessada individualmente através de seu endereçamento. Como exemplo, podemos acessar "Downloads" a partir de qualquer outra ao digitar seu endereço, sendo "192.168.1.1/Dados/Downloads".

Figura 39 – Página de dados



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 40 – Página de Downloads

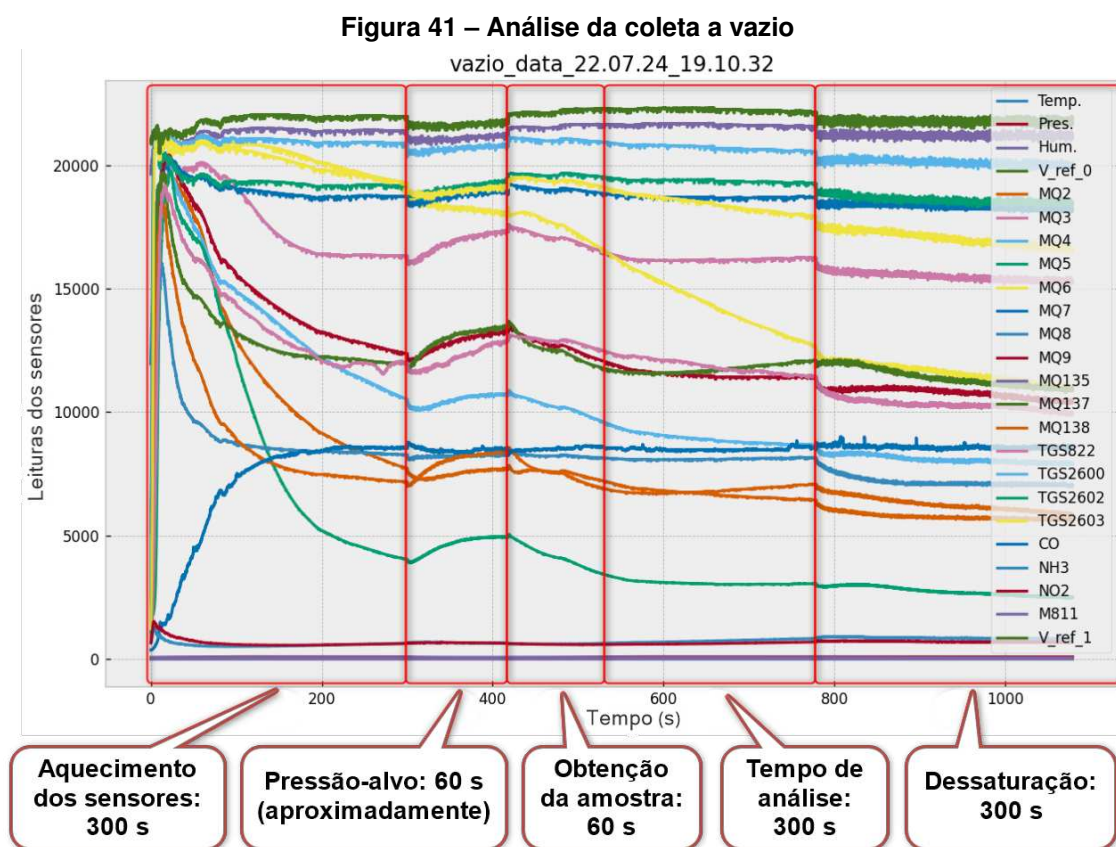


Fonte: Autoria própria (2024).

4.3 Resultados das coletas

4.3.1 Coleta a vazio

A fim de se ter um referencial para as demais coletas, a primeira coleta realizada foi a vazia. Ou seja, nela, o kitassato foi limpo e vedado, dando início em seguida ao procedimento de coleta, conforme foi definido na Subseção 3.2.5. Para facilitar o entendimento das curvas de resposta dos sensores, foram destacadas as etapas de operação conforme definido na Subseção 3.2.5, resultado na Figura 41.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.3.2 Álcool etílico

Seguindo os mesmos procedimentos descritos na Subseção 3.2.5 realizaram-se coletas utilizando álcool etílico de cereais a 95,5% GL como base, o qual foi diluído conforme o Quadro 9. Para o procedimento de diluição utilizou-se um tubo de ensaio graduado com volume de 15mL, as amostras foram misturadas diretamente no kitassato, este foi vedado e as coletas iniciadas logo em seguida.

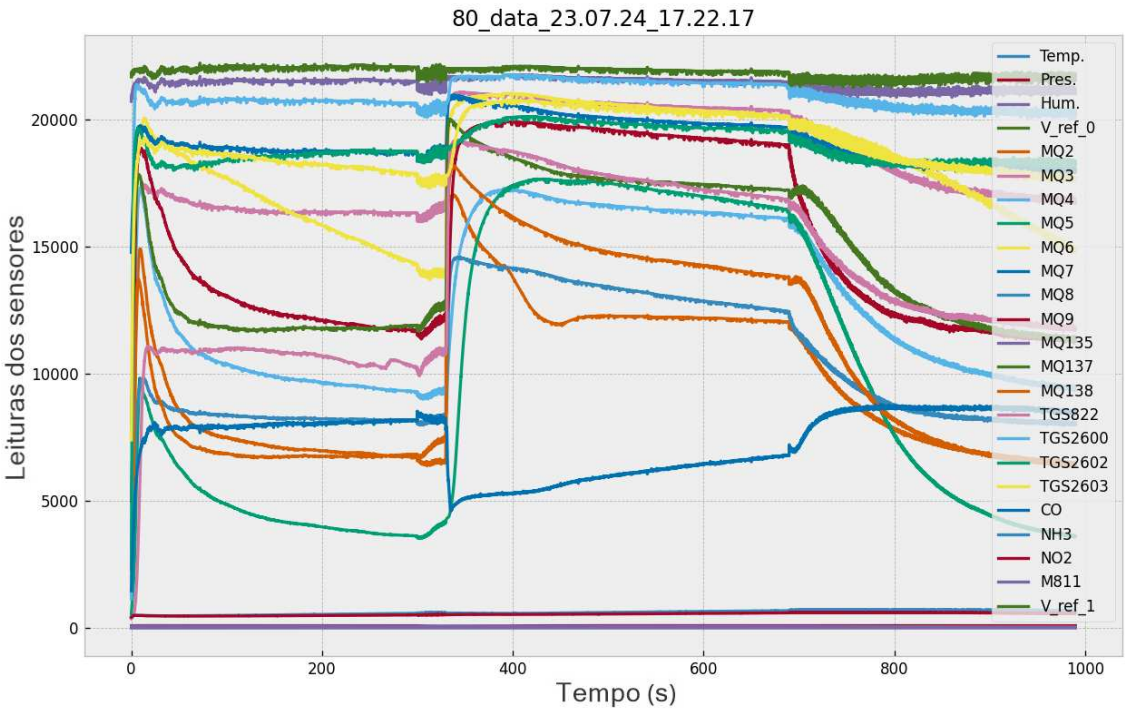
Os dados adquiridos das amostras diluídas podem ser verificados nas Figuras 42, 43, 44 e 45, respectivamente.

Quadro 9 – Diluição das amostras

Composto	% GL				
	95,5	80	60	40	20
Álcool 95,5% řGL (mL)	50	41,88	31,41	20,94	10,47
Água adicionada (mL)	0,00	8,12	18,59	29,06	39,53

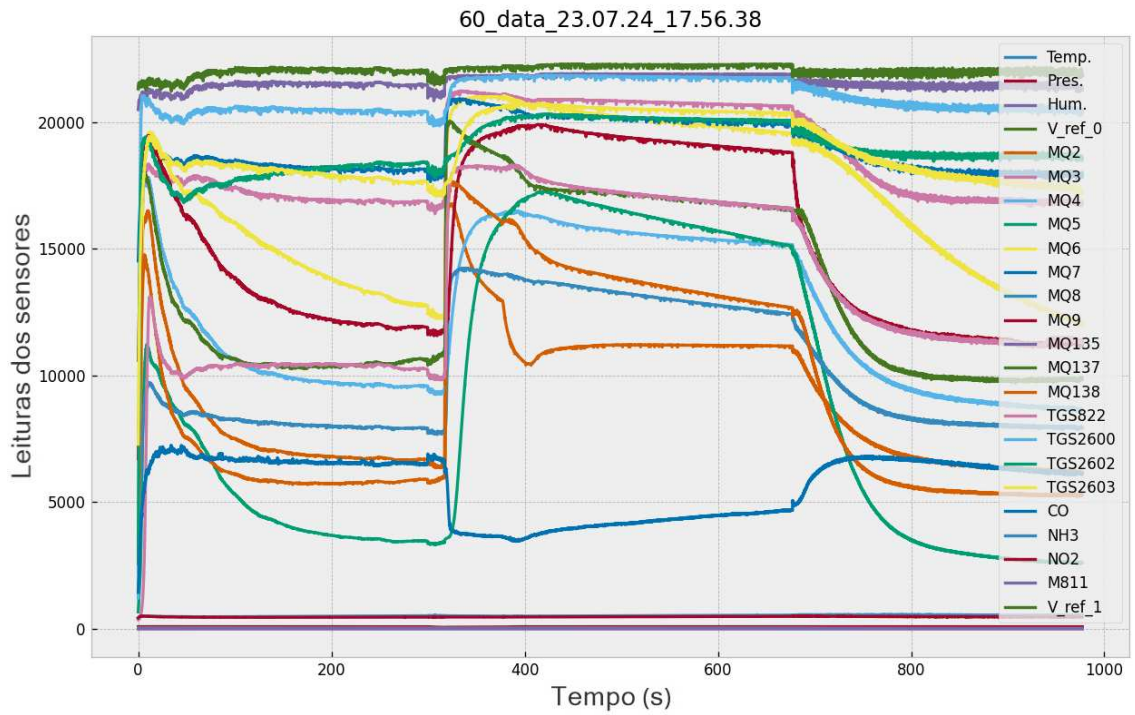
Fonte: Aatoria própria (2024).

Figura 42 – Etanol - 80% de concentração



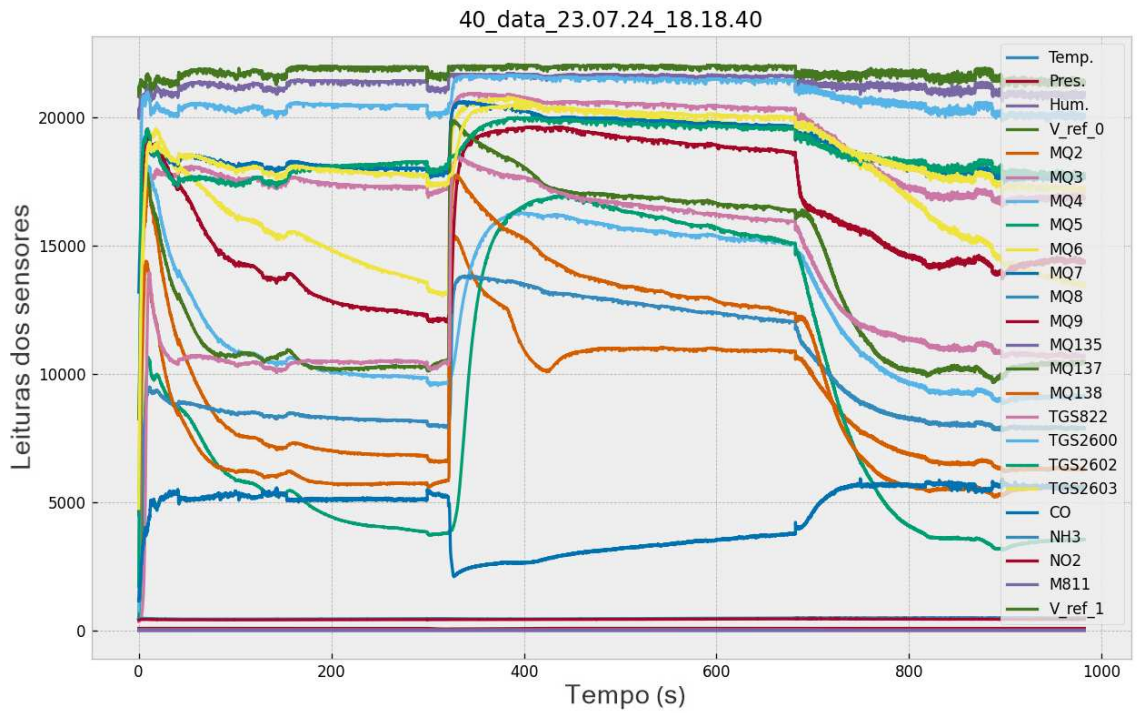
Fonte: Aatoria própria (2024).

Figura 43 – Etanol - 60% de concentração



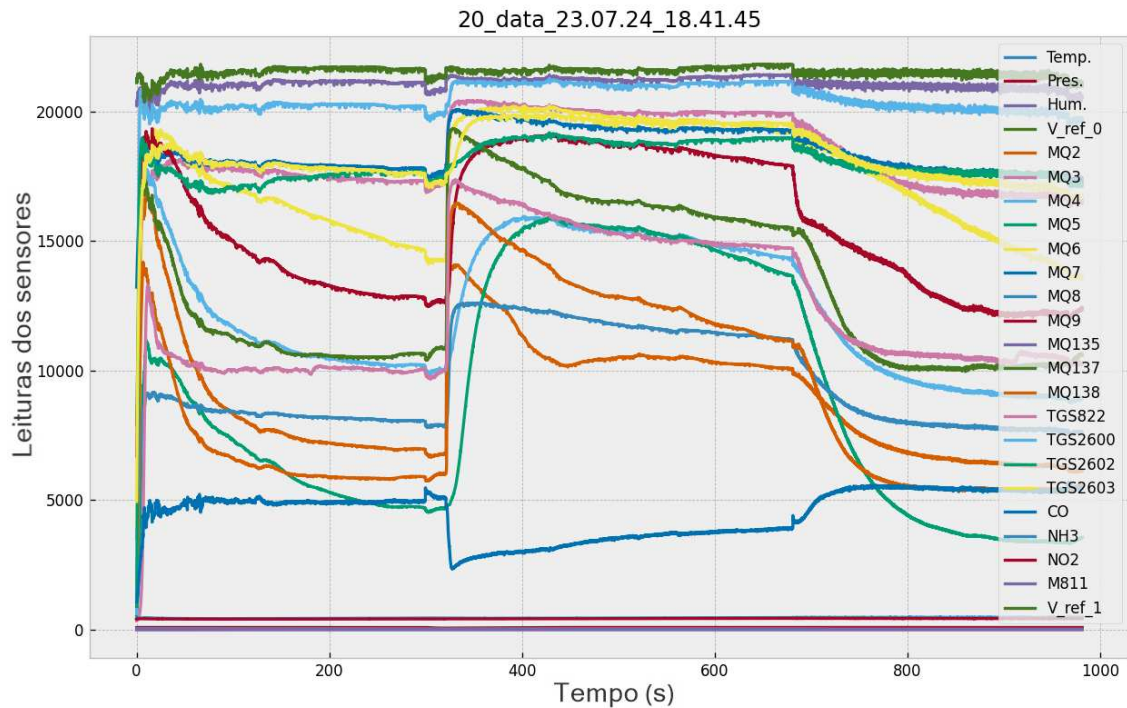
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 44 – Etanol - 40% de concentração



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 45 – Etanol - 20% de concentração



Fonte: Autoria própria (2024).

4.4 Discussão geral

Conforme mostrado durante a Seção 4.3, obteve-se resultados condizentes aos esperados. Em outras palavras, os sensores presentes no projeto apresentaram respostas consoante o indicado pelos fabricantes e resumidas no Quadro 4. Sendo assim, há um forte indicativo de que seja possível desenvolver um classificador capaz de indicar o composto e sua concentração a partir do uso do protótipo desenvolvido, assim como proposto na Seção 1.1. Dito isso, ainda sobre os objetivos, pode-se afirmar que a maioria realizados de maneira satisfatória, fazendo o uso de sensores comerciais que podem ser substituídos facilmente por estarem em soquetes, oferecendo também um ambiente controlado com repetibilidade e reprodutibilidade para a análise de compostos voláteis. Além disso, a IHM desenvolvida se mostrou robusta, confiável e de fácil uso, possibilitando o completo controle dos tempos de análise, nome do arquivo e oferecendo um fácil acesso tanto ao arquivo da análise realizada como aos demais arquivos de dados disponíveis no cartão microSD, sendo possível baixá-los via *Wi-Fi* sem a necessidade de retirada do cartão.

Outro ponto importante que guiou o projeto foi a escolha de materiais e sensores, de forma a se obter um protótipo portátil e ter um consumo energético baixo o suficiente para ser alimentado por um *powerbank*. De fato, o orçamento de potência obtido por meio dos *datashe-*

ets dos fabricantes, assim como testes práticos, mostraram que um *powerbank* comum para *smartphones* seria o suficiente para a alimentação, sobrando ainda uma margem de algumas centenas de miliampères de corrente. Todavia, em decorrência de fatores não lineares do sistema, como o pico de corrente no acionamento na bomba e alguns protocolos de segurança adotados pela bateria, não foi possível usá-la de maneira confiável. Isto significa que ora projeto funciona satisfatoriamente, ora a proteção da bateria é acionada, levando a uma reinicialização do microcontrolador do projeto. Tal razão motivou a utilização da fonte de bancada para as coletas realizadas. Logo, mesmo que não tenha sido possível atingir o objetivo proposto, alternativas de trabalhos futuros para a solução do problema foram explorados e estão descritos em detalhes na Seção 4.5.

Por outro lado, embora o projeto inicial fosse realizar a amostra com mais substâncias além do álcool, tais como amônia, butano e sucos, não foi possível realizar as coletas devido a problemas com a bomba a vácuo. Isto é, antes mesmo de se iniciar as coletas realizadas, tivemos problemas com o comutador do motor CC responsável pela extração do ar. Assim, ao o substituí-lo por um comutador de outro motor disponível no laboratório, voltou a funcionar de forma satisfatória o suficiente para dar início às coletas. Mesmo assim, foi necessário reduzir a pressão alvo para 65 kPa, muito acima dos 35 kPa que foram alcançados após a finalização do protótipo. Além de não extrair o ar com a mesma eficiência de antes, começou a apresentar problemas de vedação, resultando em uma pressão mínima por volta dos 70 kPa, além de uma grande entrada de ar pela válvula de um sentido intrínseca à bomba, resultando em uma grande perda do vácuo parcial alcançado. Dessa forma, as coletas subsequentes foram afetadas e deixadas como trabalho futuro, sobretudo devido ao curto prazo disponível para se comprar outro selador a vácuo, desmontá-lo e adaptar o motor ao protótipo.

4.5 Limitações e trabalhos futuros

Durante os testes com o protótipo, foram observadas algumas limitações no aparato físico, problemas comuns como alta impedância em contatos e fragilidade nos processos de solda foram solucionados no decorrer das validações, observou-se também que a resposta do ADS1115 não apresentou os valores esperados inicialmente, motivando a seção 3.2.2.1.

Apesar dos retrabalhos realizados em todo o aparato físico, o protótipo no estado que se encontra possui algumas limitações:

- Ruído nos dados, com variações mais consideráveis na partida da bomba e acionamento das válvulas solenoides;
- Devido ao transitório de partida da bomba e seu declínio de rendimento, a potência demandada pelo projeto é superior à fornecida pela maioria dos powerbanks comerciais;

- Durante os testes a bomba utilizada apresentou uma queda considerável de performance;
- O método de vedação com silicone provou ser frágil e pouco durável.

Considerando as limitações apresentadas, sugere-se que trabalhos futuros ou retrabalhos deste protótipo adotem, em ordem decrescente de prioridade, mas não se limitem a:

- Substituição das vedações com silicone por materiais e métodos mais robustos e duradouros;
- Investigação dos ruídos, para entender se os ruídos estão relacionados com a abordagem ou característica de operação dos sensores, com a sugestão de utilizar três fontes isoladas:
 - Circuitos de acionamento;
 - Resistências sensíveis e circuitos digitais;
 - Resistências de aquecimento.
- Isolamento mínimo entre as fontes, para eliminação dos transitórios presentes nos dados:
 - Circuitos de acionamento e controle;
 - Sensores e circuitos digitais.
- Investigação de materiais mais robustos para gerar pressão negativa no encapsulamento.

5 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho acadêmico proporcionou valiosas percepções sobre o desenvolvimento e as aplicações dos narizes eletrônicos (e-noses) para a classificação de compostos voláteis disponíveis na literatura. Assim, foi possível desenvolver nosso próprio protótipo por meio de sensores comerciais diversos, tendo também a vantagem de ser soqueteável, o que permite a troca e/ou substituição caso apresente defeito, ou mesmo caso a aplicação exija diferentes sensores. Logo, foi possível adentrar com boa profundidade no campo de pesquisa de narizes eletrônicos.

Como visto no Capítulo 1, os narizes eletrônicos oferecem capacidades de detecção não destrutivas e rápidas, se comparadas a análises químicas laboratoriais. Eles podem identificar perfis voláteis complexos associados a várias amostras e são versáteis, podendo ser aplicados na agricultura, avaliação da qualidade dos alimentos e monitoramento ambiental. No entanto, a seletividade e a estabilidade dos sensores permanecem como desafios críticos. Questões de calibração e sensibilidade cruzada afetam a precisão e os narizes eletrônicos podem ter dificuldades com compostos de baixa concentração ou misturas complexas. Como consequência, fica evidente que, apesar de se tratar de um protótipo completamente funcional, ainda é necessária mais pesquisa para resolver os problemas listados, sobretudo as limitações comentadas na Seção 4.5.

Dentre as contribuições do nosso trabalho está a melhoria na matriz de sensores utilizada, aumentando o número de sensores normalmente utilizados na literatura. Ademais, visto que os narizes eletrônicos podem aprimorar a segurança alimentar, o controle de qualidade e o monitoramento ambiental, por exemplo, sugere-se que pesquisas futuras foquem na customização dos sensores, escolhendo aqueles que melhor se adequem à aplicação almejada. Outra sugestão consiste em desenvolver métodos de calibração robustos para o protótipo, comparando os resultados obtidos com os de um sensor comercial, por exemplo. A integração com algoritmos de aprendizado de máquina pode melhorar a precisão da classificação, podendo possibilitar a classificação dos dados a fim de descrever em detalhes os compostos utilizados.

Em retrospectiva, a jornada de desenvolver e aplicar narizes eletrônicos foi tanto recompensadora quanto desafiadora. De fato, diversos desafios acometeram a equipe no decorrer do projeto, tais como difícil acesso a alguns componentes, dada a origem chinesa de vários deles, componentes apresentando falhas aparentemente inexplicáveis, investigação e resolução de conflitos entre sensores, entre outros. Em suma, superamos obstáculos técnicos, refinamos metodologias presentes na literatura e adquirimos uma compreensão mais profunda dos compostos voláteis. Como resultado, a capacidade do nariz eletrônico de capturar sutis diferenças nos perfis aromáticos tem o potencial de aplicação em diversas áreas.

Ao avaliar o alcance de nossos objetivos, reconhecemos que os narizes eletrônicos são uma ferramenta poderosa. Seus impactos potenciais se estendem além da academia, beneficiando a sociedade em geral. Seja na detecção de deterioração de alimentos, avaliação da

qualidade do ar ou auxílio em diagnósticos médicos, os narizes eletrônicos oferecem um futuro promissor.

Além dos pontos levantados na Seção 4.5, trabalhos futuros podem incluir linhas de pesquisa promissoras, como o desenvolvimento de uma rede neural para a classificação dos compostos, argumentando que as leituras obtidas são consistentes o suficiente para investigar tal abordagem. Além disso, a melhoria do visual e da portabilidade do projeto pode ser alcançada através do desenvolvimento de uma caixa impressa em impressora 3D. Outra melhoria prática seria a inclusão de um conversor CC-CC na entrada, permitindo que o dispositivo aceite outras fontes de energia, como baterias de moto ou carro. Também é relevante considerar a implementação de um plotter diretamente na interface homem-máquina (IHM) e/ou o desenvolvimento de um aplicativo para smartphones, facilitando a visualização e análise dos dados. A substituição da bomba e a melhoria da vedação do sistema são passos importantes para aumentar a eficiência e a precisão das medições. Adicionalmente, testar o dispositivo com diferentes tempos de aquecimento e com diferentes pressões pode fornecer *insights* valiosos sobre o desempenho e a adaptabilidade do nariz eletrônico a várias condições experimentais.

REFERÊNCIAS

- AFFOGNON, L. *et al.* Design of an experimental electronic nose for data collection for food quality. In: **IEEE EUROCON 2023 - 20th International Conference on Smart Technologies**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 406–411.
- ARDUINO. **MEGA 2560 - Product Reference Manual**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/static/a05fbbf1cc09b1c1c0a4ff115e573d5f/A000067-datasheet.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.
- ARDUINO. **UNO R3 - Product Reference Manual**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/static/76c5c143950f5c4803ea4745c11c6dd3/A000066-datasheet.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.
- BAK, S. Y. *et al.* Sensitivity improvement of urchin-like zno nanostructures using two-dimensional electron gas in mgzno/zno. **Sensors**, v. 19, n. 23, 2019. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/23/5195>. Acesso em: 01 jun. 2023.
- BARBOSA-PEREIRA, L. *et al.* Assessment of volatile fingerprint by hs-spme/gc-qms and e-nose for the classification of cocoa bean shells using chemometrics. **Food Research International**, v. 123, p. 684–696, 2019. ISSN 0963-9969. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996919303540>.
- BAREA-RAMOS, J. D. *et al.* Evaluation of the olfactory quality of roasted coffee beans using a digital nose. **Sensors**, v. 22, n. 22, 2022. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/22/8654>.
- BIGNELL, J.; DONOVAN, R. **Eletrônica Digital – Tradução da 5ª edição norte-americana**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2018. E-book. ISBN 9788522128242. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522128242/>.
- BISHOP, O. **Understand Electronics**. 1st. ed. Oxford, UK: Newnes, 2001. ISBN 978-0-7506-5319-0. Disponível em: <https://shop.elsevier.com/books/understand-electronics/bishop/978-0-7506-5319-0>.
- CHEN, C.-L.; LIAO, Y.-C.; FANG, M. Freshness evaluation of grouper fillets by inexpensive e-nose and spectroscopy sensors. **Microchemical Journal**, Elsevier, v. 198, p. 110145, 2024.
- CHEN, Q. *et al.* A mobile e-nose prototype for online breath analysis. **Advanced Sensor Research**, v. 3, n. 3, p. 2300018, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adsr.202300018>.
- CHEN, Y. *et al.* A feature extractor for temporal data of electronic nose based on parallel long short-term memory network in flavor discrimination of chinese vinegars. **Journal of Food Engineering**, v. 379, p. 112132, 2024. ISSN 0260-8774. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877424001985>.
- ESPRESSIF. **Analog to Digital Converter (ADC) Calibration Driver**. [S.l.], 2023. Disponível em: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/adc_calibration.html. Acesso em: 03 ago. 2024.
- ESPRESSIF. **ESP32 Series - Datasheet**. [S.l.], 2023. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 15 jul. 2023.

FORD, H.; CROWTHER, S.; COLLECTION, W. W. **My Life and Work**. Garden City, N.Y.: Doubleday, Page & company, 1922. Pdf. <https://www.loc.gov/item/22026971/>.

FU, L. *et al.* Utilizing the fusion characteristics of multispectral and electronic noses to detect soil main nutrient content. **Agriculture**, v. 14, n. 4, 2024. ISSN 2077-0472. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/4/605>.

GHAZALY, C. *et al.* Assessment of an e-nose performance for the detection of covid-19 specific biomarkers. **Journal of Breath Research**, IOP Publishing, v. 17, n. 2, p. 026006, 2023.

GUREVICH, V. **Electric Relays: Principles and Applications**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2005. ISBN 978-0849341885. Disponível em: <https://www.amazon.com/Electric-Relays-Principles-Applications-Engineering/dp/0849341884>.

HASAN, M.; SARNO, R.; SABILA, S. Optimizing machine learning parameters for classifying the sweetness of pineapple aroma using electronic nose. **International Journal of Intelligent Engineering and Systems**, v. 13, p. 122–132, 10 2020.

INSTRUMENTS, T. **ADS1113, ADS1114, ADS1115 Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference**. [S.l.], 2012. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>.

INTERNATIONAL, C. **The Transistor**. Oxford, UK: Pergamon Press, 1967. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Transistor-Commonwealth-international-electricity-electronics/dp/008012982X>.

JANATA, J. **Principles of Chemical Sensors**. Dordrecht, Holanda: Springer, 2009.

KUMAR, K. *et al.* An iot-enabled e-nose for remote detection and monitoring of airborne pollution hazards using lora network protocol. **Sensors**, v. 23, n. 10, 2023. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4885>.

KWON, S.-K.; KIM, H.-J. A dynamic range preservation readout integrated circuit for multi-gas sensor array applications. **Chemosensors**, v. 12, n. 4, 2024. ISSN 2227-9040. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9040/12/4/60>.

LIU, H. *et al.* Microhotplates for metal oxide semiconductor gas sensor applicationstowards the cmos-mems monolithic approach. **Micromachines**, v. 9, n. 11, out. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/9/11/557>. Acesso em: 01 jun. 2023.

MARTÍN-TORNERO, E. *et al.* Characterization of polyphenol and volatile fractions of californian-style black olives and innovative application of e-nose for acrylamide determination. **Foods**, v. 10, n. 12, 2021. ISSN 2304-8158. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/10/12/2973>.

MESÍAS, M. *et al.* Application of an electronic nose technology for the prediction of chemical process contaminants in roasted almonds. **Chemosensors**, v. 11, n. 5, 2023. ISSN 2227-9040. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9040/11/5/287>.

MOURTZIS, D.; ANGELOPOULOS, J.; PANOPOULOS, N. The future of the humanmachine interface (hmi) in society 5.0. **Future Internet**, v. 15, n. 5, 2023. ISSN 1999-5903. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-5903/15/5/162>.

MUNIZ, J. d. S. D. *et al.* An ann-based electronic nose for monitoring pollutant gases in landfills. *In: 2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 1–6.

RAHMAN, S. *et al.* Wireless e-nose sensors to detect volatile organic gases through multivariate analysis. **Micromachines**, v. 11, n. 6, 2020. ISSN 2072-666X. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/6/597>.

Raspberry Pi Ltd. **Raspberry Pi Pico W Datasheet**. 2022. Licença: Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-ND), <https://datasheets.raspberrypi.com/picow/pico-w-datasheet.pdf>.

Raspberry Pi Ltd. **Raspberry Pi 4 Model B Datasheet**. 2024. Release 1.1, Disponível em: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>.

SANTOS, R.; SANTOS, S. **Build Web Servers with the ESP32 and ESP8266**. [S.l.]: Random Nerd Tutorials, 2024.

TOCCI, N. S. R. J. **Digital Systems Principles and Applications**. 10. ed. [S.l.]: Prentice Hall Inc, 2007. ISBN 0-13-173969-7,.

VOSS, H. G. J. **Desenvolvimento de um Nariz Eletrônico aplicado à determinação do estágio de maturação em pessegueiros**. 2019. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, 2019. Disponível em: <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/2832>.

WAKHID, S.; SARNO, R.; SABILLA, S. I. The effect of gas concentration on detection and classification of beef and pork mixtures using e-nose. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 195, p. 106838, 2022. ISSN 0168-1699. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922001557>.

WANG, Y. *et al.* Analysis of the volatile profiles of kiwifruits experiencing soft rot using e-nose and hs-spme/gcms. **LWT**, v. 173, p. 114405, 2023. ISSN 0023-6438. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643822013408>.

WHO. **Who launches global network to detect and prevent infectious disease threats**. World Health Organization, 2023. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/20-05-2023-who-launches-global-network-to--detect-and-prevent-infectious-disease-threats>.

WÖRNER, J.; DÖRKSEN, H.; PEIN-HACKELBUSCH, M. Key indicators for the discrimination of wines by electronic noses. *In*: **2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN)**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–7.

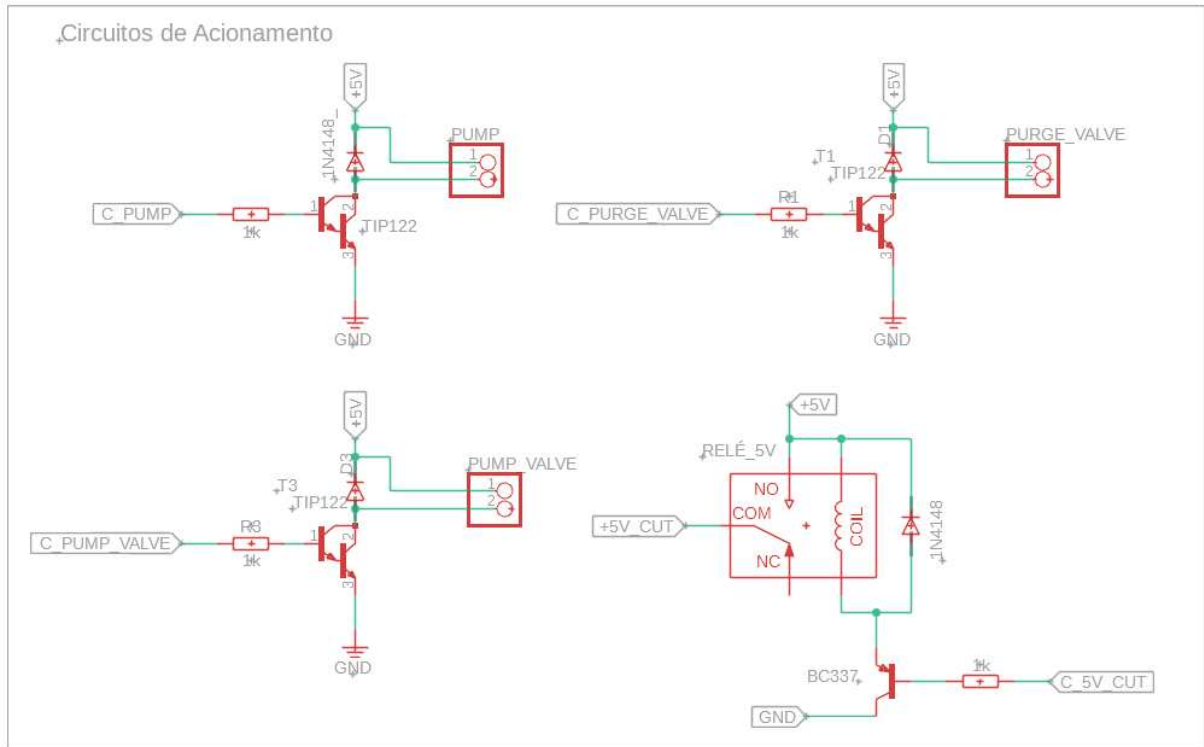
XU, J.; LIU, K.; ZHANG, C. Electronic nose for volatile organic compounds analysis in rice aging. **Trends in Food Science Technology**, v. 109, p. 83–93, 2021. ISSN 0924-2244. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224421000273>.

APÊNDICE A – Esquemáticos eletrônicos e desenhos de PCIs

Esta seção tem por objetivo apresentar os diagramas completos e projeto das PCIs, resultados da metodologia descrita no Item 3.2.

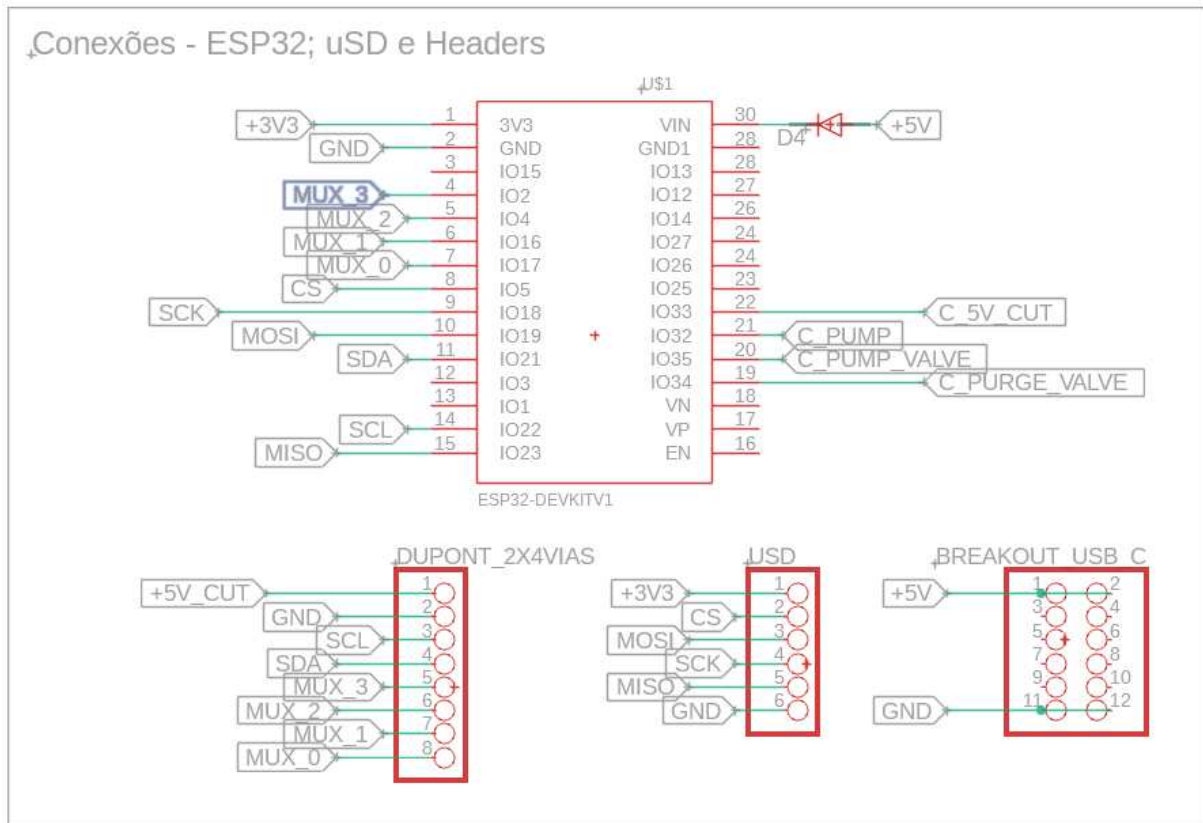
Iniciando pelas Figuras 46 e 47, com os diagramas elaborados para fabricação da PCI de Processamento.

Figura 46 – Circuitos de Comando - PCI de Processamento



Fonte: O autor.

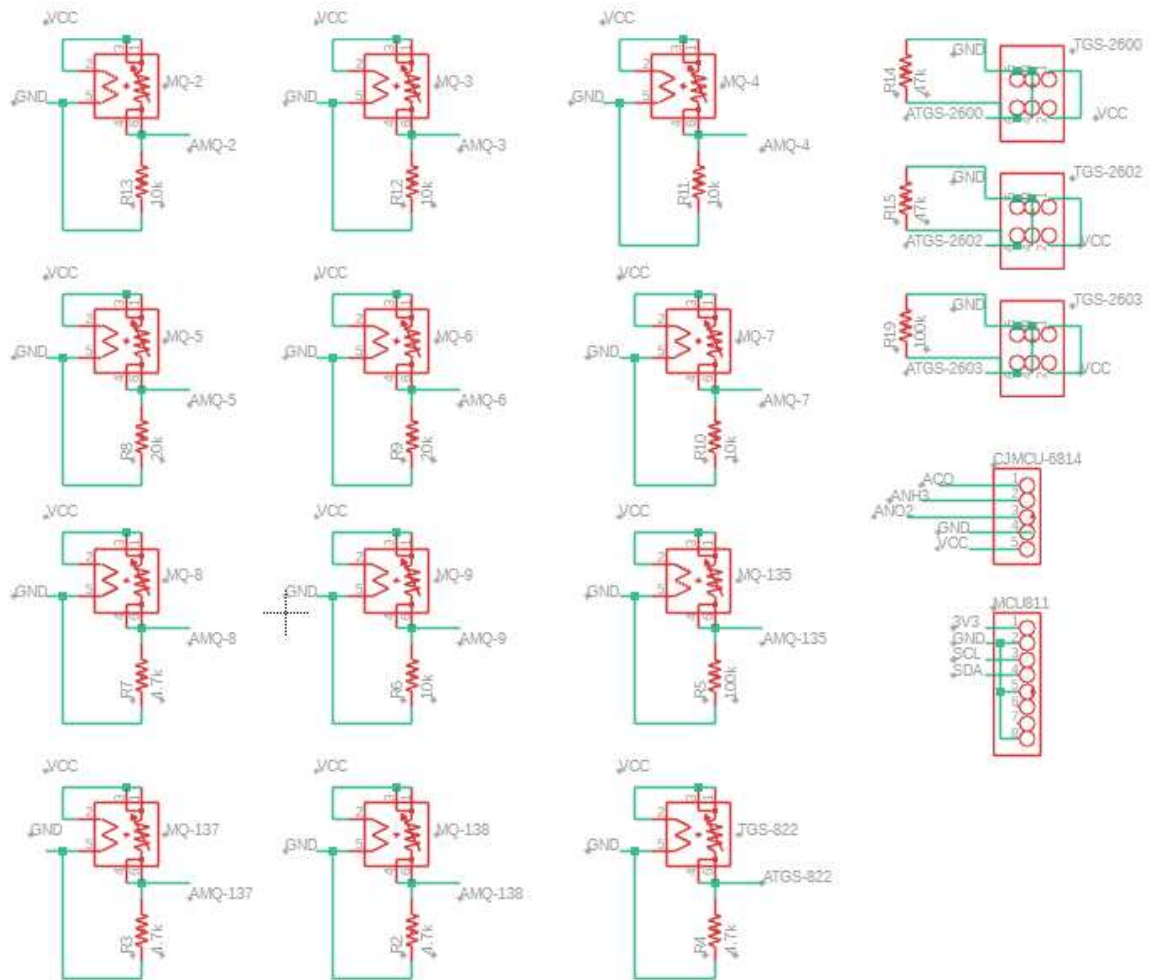
Figura 47 – Pinouts - PCI de Processamento



Fonte: O autor.

A seguir, na Fig. 48 o esquemático contendo as conexões detalhadas no MUX, *Pinout* do ADS1115, BME-280, conectores de interface entre PCIs e circuito regulador com Diodo Zener de 3,3V. Já na Fig. 49, temos todos os sensores de gases, com seus respectivos resistores R_L .

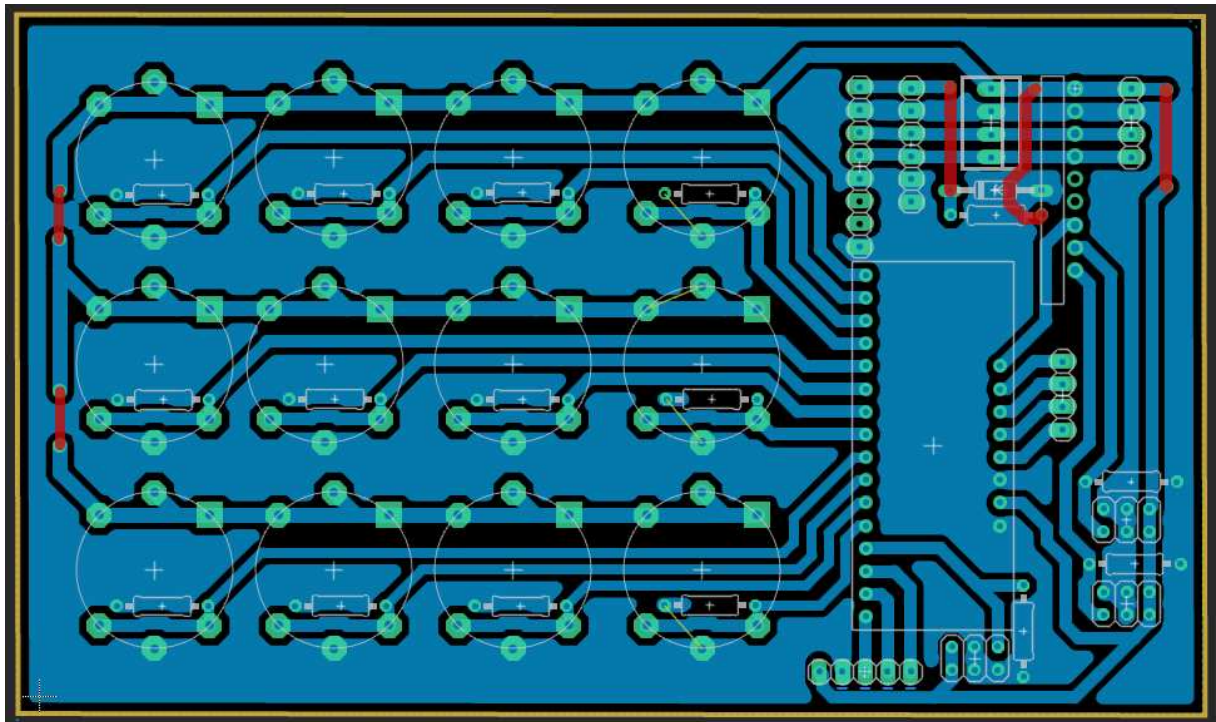
Figura 49 – Circuitos sensores de gases - PCI Sensores



Fonte: O autor.

Por fim, as Figuras 50 e 51 apresentam as versões finais do projeto das PCIs fabricadas.

Figura 50 – PCI Sensores



Fonte: O autor.

