



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE DO CAMPUS ARARANGUÁ  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Carlos Eduardo Florentino

**Sistema computacional embarcado de análise de gases para controle de  
atmosfera em pós colheita de frutas**

Araranguá  
2024

Carlos Eduardo Florentino

**Sistema computacional embarcado de análise de gases para controle de  
atmosfera em pós colheita de frutas**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Roderval Marcelino, Dr.

Araranguá

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Florentino, Carlos Eduardo

Sistema computacional embarcado de análise de gases para controle de atmosfera em pós colheita de frutas / Carlos Eduardo Florentino ; orientador, Roderval Marcelino, 2024.

46 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em Engenharia de Computação, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Computação. 2. Sistema Embarcado. 3. Análise de Gases. 4. Atmosfera Controlada. 5. Pós Colheita de Frutas. I. Marcelino, Roderval . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Computação. III. Título.

Carlos Eduardo Florentino

**Sistema computacional embarcado de análise de gases para controle de atmosfera em pós colheita de frutas**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia de Computação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Computação.

Araranguá, 12 de dezembro de 2024.

---

Prof. Jim Lau

Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Roderval Marcelino, Dr.

Orientador

---

Prof. Bruno Pansera Espíndola, Dr

Avaliador

Instituição: Instituto Federal Catarinense,  
Campus Santa Rosa do Sul

---

Prof. Anderson Luiz Fernandes Perez, Dr.

Avaliador

Instituição: Universidade Federal de Santa  
Catarina

Este trabalho é dedicado à todos os envolvidos desde a pesquisa até sua resolução.

## **AGRADECIMENTOS**

Esse trabalho não teria sido concluído sem a ajuda dessas pessoas que se propuseram a participar dessa aventura comigo. Primeiro gostaria de agradecer aos meus pais pois sem eles eu nem estaria cursando a UFSC, agradecer por sempre me apoiarem em estudar e não desistir e continuar firme na minha graduação. Também gostaria de agradecer ao professor Roderval por ter me acolhido quando eu não tinha um norte decidido ainda e além disso me ajudou a compreender e a realizar todo o escopo do projeto além de vários ensinamentos valiosos que tive no LPA. Algumas pessoas que não poderia deixar de citar também são o Anderson Conti Soprana e o Samady Biasoli Correa, que estavam praticamente todos os dias no laboratório e me ajudaram muito com ideias e sugestões de melhorias. E por último mas não menos importante, um grande agradecimento ao Otávio Mattos Moratelli por ter me ajudado a implementar o banco de dados e a interface web a tempo nesse projeto.

*“O sucesso é um professor traiçoeiro.  
Ele seduz pessoas inteligentes  
e as faz pensar que elas não podem perder tudo.  
(William Henry Gates III)*

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle atmosférico automatizado, projetado para monitorar e ajustar a concentração de gases em ambientes controlados, com o objetivo de prolongar a vida útil de frutas, reduzindo sua taxa de respiração. A base do sistema é um analisador de gases capaz de medir a concentração de diferentes gases na atmosfera por meio de sensores específicos, cuja leitura determina as ações dos atuadores para aumentar ou diminuir a quantidade desses gases no ambiente. A metodologia adotada inclui a utilização da plataforma embarcada Raspberry Pi, que gerencia todo o sistema e se comunica com sensores específicos: o sensor K33 para medições de CO<sub>2</sub>, o sensor AO2 para monitoramento de O<sub>2</sub> e o BME280, que fornece dados de pressão barométrica, temperatura e umidade. O sistema foi configurado para manter os níveis de gases dentro de faixas predeterminadas, garantindo a estabilidade atmosférica necessária para a conservação das frutas. Os resultados demonstram que o sistema não apenas monitora e ajusta os níveis de gases com eficiência, mas também registra os dados em um banco de dados e os disponibiliza em uma interface web, facilitando o acompanhamento em tempo real e oferecendo uma solução integrada e eficaz para o controle atmosférico automatizado.

**Palavras-chave:** Ambiente controlado. Analisador de gases. Raspberry pi. Preservação de frutas.



## ABSTRACT

This work presents the development of an automated atmospheric control system designed to monitor and adjust gas concentrations in controlled environments, aiming to extend the shelf life of fruits by reducing their respiration rate. The system is based on a gas analyzer capable of measuring the concentration of various gases in the atmosphere through specific sensors, whose readings determine the actions of actuators to increase or decrease the amount of these gases in the environment. The adopted methodology involves the use of the Raspberry Pi embedded platform, which manages the entire system and communicates with specialized sensors: the K33 sensor for CO<sub>2</sub> measurements, the AO2 sensor for O<sub>2</sub> monitoring, and the BME280, which provides barometric pressure, temperature, and humidity data. The system was configured to maintain gas levels within predetermined ranges, ensuring the atmospheric stability required for fruit preservation. The results demonstrate that the system not only efficiently monitors and adjusts gas levels but also records data in a database and displays them on a web interface, enabling real-time monitoring and offering an integrated and effective solution for automated atmospheric control.

**Keywords:** Controlled environment. Gas analyzer. Raspberry pi. Fruit preservation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – AO2 O <sub>2</sub> Sensor citicel. . . . .	20
Figura 2 – SprintIR®-6S-5 5% CO <sub>2</sub> Sensor. . . . .	21
Figura 3 – K33 CO <sub>2</sub> Sensor SenseAir. . . . .	22
Figura 4 – Fluxograma da metodologia. . . . .	25
Figura 5 – Armazenamento Refrigerado. . . . .	26
Figura 6 – Raspberry pi 4 model B. . . . .	27
Figura 7 – PCF 8574. . . . .	28
Figura 8 – Interface da tela principal. . . . .	29
Figura 9 – DWIN Touch Display HDW070-008LZ02. . . . .	30
Figura 10 – ADS 1115. . . . .	31
Figura 11 – Hardware. . . . .	32
Figura 12 – Interface de calibração dos sensores com gás conhecido. . . . .	36
Figura 13 – Bancada de Testes. . . . .	37
Figura 14 – Sistema elétrico dos atuadores. . . . .	38
Figura 15 – Diagrama de entidade-relacionamento do banco de dados. . . . .	40
Figura 16 – Interface do Grafana. . . . .	41
Figura 17 – Bananas utilizadas no teste. . . . .	42
Figura 18 – Teste de respiração da fruta. . . . .	43
Figura 19 – Controle dos gases. . . . .	44

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	APRESENTAÇÃO DO TEMA	12
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	OBJETIVOS	14
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>14</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>14</b>
<b>1.3.3</b>	<b>Problemática</b>	<b>14</b>
<b>1.3.4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1	PLATAFORMAS COMPUTACIONAIS EMBARCADAS	17
2.2	SENSORES	19
2.3	MONITORAMENTO DE DADOS	22
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>25</b>
3.1	METODOLOGIA	25
3.2	ESTUDO TEÓRICO DA TECNOLOGIA E DO TEMA	26
3.3	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE GRÁFICO E INTERFACE	28
3.4	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE LEITURA DOS SENSORES	29
3.5	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE CONTROLE AUTOMÁTICO DA CÂMARA	35
3.6	MODELAGEM DO BANCO DE DADOS E LEVANTAMENTO DE REQUISITOS DA APLICAÇÃO WEB	39
3.7	INTEGRAÇÃO DO SISTEMA EMBARCADO COM O BANCO DE DADOS E INTERFACE WEB	40
3.8	MONTAGEM DE BANCADA DE TESTES E REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS COM FRUTAS	41
3.9	ANÁLISE DOS TESTES E RESULTADOS	42
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As frutas são essenciais na alimentação humana, porém, nos últimos anos, tornaram-se um item caro. O avanço tecnológico e a maior acessibilidade a pesquisas e descobertas científicas têm conscientizado o público sobre os benefícios de uma alimentação saudável, contribuindo para essa valorização. Após a pandemia de covid-19 em 2020, segundo o Google Trends, houve um grande aumento nas buscas por frutas e alimentos saudáveis no Google Search. Desta forma, é possível observar um aumento significativo na pesquisa por frutas e vegetais ao longo dos últimos anos, refletindo o crescimento do interesse por esses alimentos.

As frutas após colhidas respiram como os humanos. Enquanto na planta, as folhas inspiram gás carbônico e expiram gás oxigênio. A fruta, assim que separada da planta, inspira gás oxigênio e expira gás carbônico. Como elas não podem mais se abastecer de nutrientes providos da terra, devem sobreviver com base em suas próprias reservas acumuladas ao longo do tempo (LIDSTER *et al.*, 1990).

Um analisador de gás possui diversas aplicações em áreas totalmente distintas. Uma delas é na agricultura, com o armazenamento de frutas. A fruta após colhida perderá nutrientes constantemente, assim impactando diretamente na qualidade e na quantidade do produto. As frutas frescas se deterioram proporcionalmente à sua respiração. O armazenamento de frutas sob atmosfera controlada tem um impacto positivo na qualidade geral do fruto, no que diz respeito à redução de distúrbios fisiológicos e maior firmeza de polpa.(THEWES *et al.*, 2021).

Há também aplicações de analisadores de gás na área da saúde e da segurança pública. Como por exemplo nos inaladores de oxigênio nos hospitais ou nas máscaras de mergulho e de combate a incêndio utilizados por mergulhadores e bombeiros. O sistema de fornecimento de gás geralmente é construído em torno de tanques com gás comprimido. Um sistema regulador reduz a pressão dos tanques até a pressão ambiente. Um indivíduo respira normalmente por meio de uma válvula “sob demanda”, que fornece gás respiratório fresco do tanque, sempre que a pessoa inspira.(A. SIEBER; KROZER, 2012)

O analisador de gases pode também ser utilizado para o controle dos gases dentro de um motor a combustão ou até no controle da qualidade do ar de uma cidade com o objetivo de ter-se menos poluição atmosférica na região. Os gases a serem analisados no projeto serão o oxigênio e o gás carbônico. O analisador e controlador de gases que foi desenvolvido tem uma margem de análise entre 0 e 21 por cento para o sensor de oxigênio e 0 a 10 por cento para o sensor de gás carbônico. Todos os dados coletados pelos sensores são atualizados a cada 10 minutos e mostrados em um display touch LCD acoplado à plataforma de desenvolvimento computacional Raspberry pi. Além do display, os dados serão armazenados em um banco de dados PostgreSQL e apresentados em uma aplicação web.

Conforme a aplicação, um analisador de gases pode oferecer resultados altamente positivos, seja na otimização financeira, como na agricultura, na preservação da vida, como na área da saúde, ou na eficiência energética, como no controle de emissões em veículos. Grande parte das espécies de frutas tem uma janela de colheita que é concentrada em um período pequeno do ano. Isto faz com que seja necessário estocar uma porção da produção para suprir a falta dessa fruta durante a temporada de produção (STEFFENS *et al.*, 2007). Na agricultura o ato de estocar as frutas permite com que o produtor consiga escolher em que período do ano será vendido os produtos. No entanto, quanto mais tempo a fruta fica em estoque, maior o risco da perda do produto e menor sabor terá concentrado na fruta. O estoque é geralmente feito em câmaras frias que precisam manter as frutas em temperaturas específicas. Esse tipo de estoque de frutas tem basicamente 3 objetivos, que são eles, reduzir a atividade biológica do fruto, retardar o processo de maturação e diminuir a atividade dos microrganismos (FLORES, 2000).

Como uma evolução para o armazenamento refrigerado têm-se a atmosfera controlada, na qual o estoque é geralmente feito sobre baixas temperaturas, baixo nível de oxigênio e alto nível de gás carbônico para reduzir o metabolismo da fruta ao mínimo e para estender a vida pós-colheita (BRACKMANN; WEBER; OUTROS, 2008). Com o controle desses gases na atmosfera controlada, é possível aumentar significativamente o tempo de vida dessas frutas em estoque, assim o produtor tem mais tempo para vendê-las, tendo então menos chances de ter prejuízo em sua colheita, e como resultado poderemos ver uma melhora significativa na qualidade desses alimentos.

Este trabalho tem o objetivo de utilizar a plataforma computacional embarcada raspberry pi, para o desenvolvimento de um sistema computacional embarcado integrando hardware e software para medição, análise e controle de oxigênio e gás carbônico em pós colheita de frutas. Os dados coletados foram armazenados em um banco de dados e mostrados em uma página web.

## 1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

Com a revolução industrial se fez necessário ter algo que auxiliasse a detecção de gases pois houve uma grande utilização de carvão para as máquinas. Como o carvão era extraído da terra pelos mineiros, a única maneira de proteção à exposição de metano no subsolo era o capacete e as luzes de chama. O gás metano é incolor e inodor então é de difícil percepção aos olhos humanos, até que seja possível ver alterações na saúde dos mineiros. Assim para melhor segurança dos trabalhadores ocorreu vários experimentos para detecção de gases.

No início do século XIX, o primeiro método registrado para detecção de gás envolvia mineiros que usavam capacetes com luzes de chamas. Para se protegerem de explosões de metano, eles cobriam o corpo com uma manta espessa e úmida enquanto carregavam um pavio longo com a ponta acesa. Ao entrar na mina, procuravam bolsas de metano no ar

ou nas paredes, observando se o pavio reagia ao gás inflamável. Esse método rudimentar permitia que detectassem metano visualmente, embora fosse perigoso. Com o passar do tempo, foram desenvolvidos métodos mais seguros e modernos para detecção de gás, substituindo esses sistemas primitivos.

Décadas mais tarde, no século XX, muitos dos primeiros sensores de gás modernos começaram a ser baseados em materiais semicondutores, como óxidos metálicos. O avanço nos transistores semicondutores foi crucial para essa evolução, impulsionando pesquisas que exploravam materiais semicondutores para uso em sensores. Por exemplo, sensores de gás baseados em óxidos de estanho ( $\text{SnO}_2$ ) surgiram nas décadas de 1960 e 1970, diretamente beneficiados pela miniaturização e eficiência proporcionadas pela tecnologia de transistores. Muitos dos novos conceitos na construção dos sensores de gás semicondutores (SGS) foram derivados das tecnologias de microeletrônica dos últimos 40 anos. O desenvolvimento desses materiais foi fortemente baseado na ciência dos semicondutores e na catálise química, permitindo a criação de sensores mais sensíveis, precisos e seguros, tornando a detecção de gases uma tarefa muito mais eficaz e confiável em comparação com os métodos rudimentares do passado. (MIZSEI, 2016)

A atmosfera controlada (AC) é uma das técnicas que complementa o estoque de frutas, além do método padrão de armazenamento refrigerado onde é controlado a umidade relativa e a temperatura, a AC controla os gases na câmara, sendo eles, gás carbônico e oxigênio. A porcentagem de gás no ambiente da câmara varia de acordo com as necessidades da fruta em questão, no entanto o oxigênio dentro do ambiente controlado é reduzido até uma margem entre 1 e 3 por cento e o gás carbônico é elevado entre 2 e 20 por cento.

A AC teve sua primeira aparição no século XIX na Europa em 1922, onde os pesquisadores ingleses Kidd e West desenvolveram o método para armazenar maçãs e pêras. No Brasil sua aparição se deu em 1982 onde pode-se ver a primeira AC, na cidade de Fraiburgo em Santa Catarina(SC). O processo de armazenar o produto e modificar a atmosfera que ele se encontra se tornou popular entre outros tipos de produtos alimentícios como: Carnes, frutos do mar, aves e hortaliças. Segundo (BRACKMANN, 2017), a utilização de AC pode prolongar em cerca de 50 a 70 por cento o período de conservação e pode manter uma superior qualidade das frutas por meio de: Retardamento do amadurecimento, Redução de ocorrência de podridões e distúrbios fisiológicos, Diminuição da perda de peso e murchamento de frutas, Aumento a vida de prateleira das frutas e Viabilização de uma colheita num estado mais avançado de maturação, quando as frutas apresentam melhor qualidade.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A tecnologia de atmosfera controlada ainda é recente no Brasil, e não se tem sistemas ACs nacionais, os equipamentos utilizados são de empresas internacionais. Uma das

desvantagens de se utilizar o método AC é o custo elevado do investimento, além do custo de manutenção. Para grande parte dos produtores brasileiros, importar o equipamento de fora do Brasil seria um custo exorbitante em relação ao tempo que precisaria para usufruir do lucro deste investimento.

Este trabalho visa desenvolver um sistema computacional embarcado que possa analisar e controlar os gases oxigênio e dióxido de carbono de um ambiente. Além disso, propõe-se um enfoque na viabilidade econômica utilizando a plataforma computacional Raspberry Pi e sensores avançados, aplicados à agricultura de precisão, de modo a equilibrar a eficiência tecnológica com a otimização de recursos financeiros e operacionais.

### 1.3 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste TCC.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema computacional embarcado para monitorar e controlar os níveis de oxigênio e gás carbônico em tratamento de pós colheita de frutas.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Estudar e especificar os dispositivos que serão utilizados;
- b) Desenvolver um sistema para controle de gases completo incluindo hardware e software
- c) Modelar um banco de dados e desenvolver uma aplicação web capaz de ler e armazenar os dados analisados pelos sensores, apresentando-os de forma acessível online.
- d) Integrar o banco de dados e a aplicação web no Raspberry Pi e no software desenvolvido.
- e) Avaliar parâmetros de funcionamento como precisão, estabilidade, ajustes, dentre outros.

#### 1.3.3 Problemática

O projeto enfrenta o desafio de integrar sensores avançados de gases, como oxigênio ( $O_2$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ), ao Raspberry Pi para monitorar e controlar o ambiente interno de uma câmara de armazenamento. O objetivo é criar um ambiente controlado que

permita o ajuste preciso da composição de gases, essencial para prolongar a conservação de frutas.

**Principais Desafios:**

**Comunicação dos Sensores com o Raspberry Pi:** Implementar a leitura eficiente e precisa dos valores dos sensores via interfaces como I<sup>2</sup>C e UART, garantindo a coleta contínua e confiável dos dados de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.

**Controle de Eletroválvulas via Relés:** Com base nas leituras dos sensores, o sistema precisa acionar eletroválvulas para injetar ou liberar gases, mantendo a composição dentro dos níveis ideais.

**Interface de Monitoramento e Calibração:** Desenvolver uma interface visual intuitiva para exibir as leituras em tempo real no display. Além disso, deve permitir a calibração manual dos sensores, garantindo que as medições sejam sempre precisas.

**Objetivo:** Criar um sistema integrado que automatize o controle dos níveis de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, ajustando a atmosfera de acordo com a necessidade da fruta armazenada. Isso é vital para garantir que o ambiente esteja sempre na faixa ideal de gases, promovendo a preservação e a qualidade do produto durante o armazenamento.

Este projeto visa não apenas automatizar o controle dos gases, mas também oferecer ao usuário uma interface clara e prática para monitorar e ajustar o sistema conforme necessário, garantindo eficiência no processo.

### 1.3.4 Metodologia

Este trabalho utilizou uma metodologia de pesquisa aplicada com o objetivo de desenvolver um sistema embarcado de controle atmosférico para câmaras de conservação de frutas. A pesquisa foi organizada em oito etapas principais:

**Estudo Teórico da Tecnologia e do Tema:** Inicialmente, foram realizadas pesquisas em artigos científicos, documentos técnicos e referências de trabalhos anteriores relacionados ao controle atmosférico, sensores de gases e sistemas embarcados, proporcionando uma base sólida para o desenvolvimento.

**Desenvolvimento do Software Gráfico e Interface:** Foi projetada e implementada uma interface gráfica para interação com um display touch, garantindo uma experiência de usuário intuitiva e eficiente.

**Desenvolvimento do Software de Leitura dos Sensores:** Nesta etapa, foi criado o software responsável pela comunicação com os sensores, incluindo funcionalidades de calibração e ajustes necessários para garantir medições precisas.

**Desenvolvimento do Software de Controle Automático da Câmara:** O sistema de controle foi programado para gerenciar eletroválvulas via relés, regulando automaticamente os níveis de gases dentro da câmara, assegurando a manutenção do ambiente nas condições desejadas.

**Modelagem do Banco de Dados e Levantamento de Requisitos da Apli-**



**cação Web:** O banco de dados foi modelado para armazenar principalmente os dados das leituras dos sensores e os acionamentos realizados. Paralelamente, foram definidos os requisitos necessários para a interface web, garantindo a funcionalidade e a acessibilidade remota.

**Integração do Sistema Embarcado com o Banco de Dados e Interface Web:** Foi realizada a integração do software com o banco de dados e a interface web, permitindo a atualização e visualização em tempo real dos dados capturados pelos sensores.

**Montagem de Bancada de Testes e Realização de Experimentos com Frutas:** Uma bancada de testes foi montada conforme o planejamento inicial. Experimentos foram conduzidos com e sem frutas para avaliar a eficiência do sistema em condições reais.

**Análise dos Testes e Resultados:** Por fim, os dados coletados durante os experimentos foram analisados, permitindo a validação do sistema e a verificação de sua capacidade em manter os níveis de gases dentro das faixas desejadas.

Essa metodologia garantiu uma abordagem estruturada, permitindo o desenvolvimento de um sistema eficiente, capaz de monitorar e controlar a atmosfera da câmara de conservação com precisão. No desenvolvimento, cada uma dessas etapas será detalhada para apresentar o processo e os resultados obtidos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado algumas plataformas computacionais, suas vantagens e desvantagens.

### 2.1 PLATAFORMAS COMPUTACIONAIS EMBARCADAS

As plataformas de prototipação são placas pré-fabricadas projetadas para permitir que os usuários testem diferentes tipos de sistemas sem a necessidade de construir a PCB((Printed Circuit Board)Placa de circuito impresso), isto é algo que não existia até pouco tempo atrás. Essas placas possuem um microchip ou até um conjunto de chips.

Algumas das placas que permitem os sistemas embarcados serem prototipados são: Placas FPGA da Altera, como a NetFPGA e Placas DSP como TMS320C6713 da Texas Instrument's. Há também placas que possuem microprocessadores como: Arduino, Raspberry Pi e BeagleBoard.(JAMIESON; HERDTNER, 2015).

O Arduino é uma placa de prototipagem de código aberto amplamente utilizada por estudantes, profissionais e entusiastas da área para desenvolvimento de aplicações embarcadas devido a seu hardware e software ser relativamente simples de aprender e executar. (ARDUINO, 2024)

Algumas vantagens de se utilizar o arduino são: Simplicidade do IDE, na qual permite que usuários sem experiência consigam ter uma experiência de eletrônica e programação de forma prática e relativamente fácil. O Arduino possui uma comunidade ampla devido a sua simplicidade, vários usuários compartilham projetos, tutoriais e bibliotecas online, facilitando assim o aprendizado em relação a essa placa. Outra vantagem do Arduino é seu baixo custo, essa placa de prototipagem possui um custo relativamente baixo em comparação a outras placas do gênero.

Dentre as desvantagens do Arduino pode-se citar: O seu tamanho e o consumo de energia que para algumas aplicações pode não ser o ideal, necessitando assim de uma placa menor ou também que tenha um consumo de energia reduzido. O Arduino possui limitação de processamento, memória e armazenamento em comparação a outros tipos de placas embarcadas mais avançadas.

BeagleBoard é um computador de placa única de código aberto, muito utilizada para aplicações embarcadas que necessitam de operações de processamento mais avançadas. (BEAGLEBOARD, 2024) Ela possui um processador ARM, memória RAM, interfaces de entrada e saída, conectores de rede e tem a capacidade de rodar sistemas operacionais como Linux, Android ou outro SO que seja baseado em Unix.

Algumas vantagens da BeagleBoard são: Capacidade de processamento elevado, essa placa possui processadores ARM que oferecem um alto desempenho em comparação com outras placas embarcadas em processamento de dados, execução de aplicativos e multi-tarefas. Ela também pode rodar sistemas operacionais completos como várias distribuições

Linux (Debian, Ubuntu) e Android.

Com o alto poder de processamento da BeagleBoard em comparação com suas concorrentes como Arduino ou Raspberry Pi, pode-se citar algumas desvantagens como o alto custo do equipamento, a complexidade de uso principalmente para iniciantes que podem ter problemas em configurar a placa e utiliza-la. Essa placa também possui um consumo maior de energia, sendo assim um problema por exemplo para projetos que utilizam de bateria. Como o preço desse equipamento é elevado em comparação à seus concorrentes, a comunidade que utiliza a BeagleBoard é relativamente menor que a do Raspberry Pi por exemplo, resultando em menos recursos disponíveis como tutoriais, bibliotecas, etc.

A NVIDIA Jetson Nano, ou também chamada de Nano Jetson, é uma plataforma de computação de borda na qual tem o foco em aplicações com inteligência artificial. (NVIDIA, 2024). A Jetson Nano é um computador de placa única, equipado com um SoC (System on Chip) NVIDIA que inclui uma GPU, um CPU ARM e 4GB de RAM. Ela pode rodar o sistema operacional JetPack da NVIDIA, que é baseado no Ubuntu Linux.

A Jetson Nano tem seu diferencial no processamento gráfico, possuindo vantagens em relação às suas concorrentes devido a interação com inteligência artificial, na qual a sua GPU Maxwell com 128 núcleos CUDA, permite processamento de imagens e vídeos, reconhecimento de objetos e inferência de modelos de aprendizado de máquina. Ela possui suporte a bibliotecas e frameworks de IA como TensorFlow, PyTorch, Caffé e OpenCV, assim tornando mais fácil o desenvolvimento e a implementação de modelos de aprendizado de máquina.

Essa placa tem dentre suas desvantagens uma limitação de memória RAM, na qual possui apenas 4GB de RAM, assim podendo comprometer o desempenho para algumas aplicações de treinamento de modelos grandes de aprendizado de máquina. Outra desvantagem da Jetson Nano é o armazenamento interno que se dá por cartão microSD que pode comprometer o desempenho do sistema devido a velocidade de leitura e escrita serem baixas. Alguns modelos mais recentes possuem suporte para armazenamento via USB ou SSD M.2 mas isto pode aumentar o custo do produto significativamente.

Segundo (JAMIESON; HERDTNER, 2015) O Raspberry Pi é um computador de baixo custo, do tamanho de um cartão de crédito, que se conecta a um monitor de computador ou TV e usa teclado e mouse padrão. É um pequeno dispositivo que permite que pessoas de todas as idades explorem a computação e aprendam a programar em linguagens como Scratch e Python. (FOUNDATION, 2024)

O Raspberry pi teve seu lançamento em 2011, pela Raspberry Pi Foundation, com o objetivo de promover o ensino de ciências da computação em escolas e países em desenvolvimento. Ele utiliza do sistema operacional Linux e veio ao mercado como uma placa de baixo custo. O desenvolvimento do Raspberry Pi teve início em 2006 quando Eben Upton e outros membros da Universidade de Cambridge notaram que havia uma

menor adesão dos estudantes a estudar computação.

A placa do Raspberry possui CPU, GPU integrada, memória RAM e entradas para dispositivos externos. Essa placa como qualquer outra tecnologia também traz algumas desvantagens sendo uma delas a capacidade de processamento limitado em comparação a computadores ou a própria BeagleBoard, alguns modelos de Raspberry possuem memória RAM limitada, restringindo assim funções multitarefas. Outra desvantagem é o uso de cartões SD ou de pendrive para o armazenamento interno, isso pode diminuir o desempenho do sistema devido a velocidade de leitura e escrita desses aparelhos serem menores que a de um SSD ou HDD. Há diversos trabalhos que utilizam o Raspberry Pi como sistema embarcado para detecção de gases. Segundo (JOSHI; JUGRAN, 2020) foi utilizado do Raspberry para detecção de gases voláteis, como amônia, etanol, dióxido de carbono, etc. Onde criou-se uma plataforma embarcada utilizando os sensores MOS, TGS823 e TGS800 para controle de qualidade do ar.

## 2.2 SENSORES

Existem diversos tipos de sensores de detecção de gases, cada um possui seu tipo de operação, vantagens e desvantagens. Um deles são os Sensores de Óxido Metálico (MOS) no qual se baseiam na mudança de resistência de um semicondutor de óxido metálico quando exposto a gases, no qual o sensor é aquecido para uma temperatura específica que otimiza a reação entre o gás e a superfície do sensor. Quando os gases alvo entram em contato com a superfície aquecida do sensor, ocorrem reações químicas que alteram a concentração de oxigênio adsorvido na superfície do sensor. Segundo (JAIN, 2011) as características operacionais dos sensores de gás de estado sólido são controladas por três fatores independentes, como função do receptor (reconhecimento), função do transdutor e construção do sensor. A função do receptor fornece a capacidade da superfície do óxido interagir com o gás alvo, e a função do transdutor fornece a capacidade de converter o sinal causado pela interação química da superfície do óxido em sinal elétrico. A superfície dos óxidos metálicos é responsável pela função receptora dos sensores de gás de estado sólido. Esse tipo de sensor pode detectar gases como amônia, monóxido de carbono, metano, butano, hidrogênio, etileno, e entre outros. Algumas de suas vantagens são: Alta sensibilidade na detecção de gases e custo relativamente baixo. Uma de suas desvantagens é o consumo de energia para manter o elemento aquecido, podendo sofrer interferências de umidade e temperatura.

Outro tipo de sensor de detecção de gases são os Sensores Eletroquímicos, eles produzem uma corrente elétrica quando um gás reage com o eletrodo do sensor. Segundo (AL., Y. M. et, 2023) um detector eletroquímico basicamente consiste em uma interface eletroquímica e uma interface de leitura. A interface eletroquímica atua como um transdutor para converter especificações químicas em indicadores eletrônicos, como alterações de potencial, corrente ou impedância. A interface de leitura é usada para polarizar a corrente

e o potencial exigidos pela interface eletroquímica e para ler os indicadores elétricos convertidos. Podem detectar gases como monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, oxigênio, amônia, cloro, dentre outros. Dentre suas vantagens pode-se citar alta precisão e seletividade, e baixo consumo de energia. Dentre as desvantagens tem-se a vida útil limitada do sensor devido as reações eletroquímicas e esses sensores são sensíveis a temperaturas extremas.

Um exemplo de sensor eletroquímico é o sensor de oxigênio da citicel AO2. Ele não possui VCC, ou seja, ele não requer tensão externa para o seu funcionamento pois possui uma alimentação interna de 7mV, devido a reação química dentro dele. Devido a isso esse sensor possui uma duração em ar fresco de apenas 2 anos por ser um sensor eletroquímico. O tempo de resposta do sensor para realizar uma leitura de até 90% de precisão é de apenas 5 segundos. Na Figura 1 tem-se um exemplo do modelo do sensor.

Figura 1 – AO2 O<sub>2</sub> Sensor citicel.



Fonte: <https://econtroldevices.com/product/oxygen-sensor-aO2-aa428-210/>

Sensores Infravermelhos também são muito comuns para detecção de gases no qual medem a absorção de luz infravermelha por gases específicos. Cada tipo de gas absorve a luz infravermelha em comprimentos de onda específicos. Dentre os gases detectados por esse tipo de sensor pode-se citar dióxido de carbono, metano, hidrocarbonetos, vapor de água. Os Sensores Infravermelhos possuem vantagens como uma alta Precisão e sensibilidade pois fornecem medições precisas e confiáveis da concentração de gás, mesmo em níveis baixos. Esse tipo de sensor possui estabilidade a longo prazo, resultando em menor necessidade de recalibração frequente. Sensores Infravermelhos possuem desvantagens como o custo elevado em relação a sensores MOS e eletroquímicos. Esses sensores possuem sensibilidade a poeira e umidade podendo assim interferir na análise dos gases. Outra desvantagem é sua complexidade elevada em comparação com seus concorrentes no qual pode aumentar custos de calibração e manutenção do sensor.

Na detecção de gás, há vários sensores de diferentes empresas que, embora realizem

a mesma função de medir gases, possuem especificações distintas. Dependendo dessas especificações, um sensor específico pode ser requerido para determinadas aplicações. Um exemplo são os sensores de gás carbônico como o SprintIR-6S-5 20% CO<sub>2</sub> que pode realizar até 20 leituras por segundo, sendo ideal para situações onde a concentração de CO<sub>2</sub> muda rapidamente ou quando a aplicação requer alta repetição de medições. Esse sensor tem essa alta capacidade de leitura devido ao seu adaptador padrão de fluxo contínuo, no qual permite que o gás CO<sub>2</sub> passe sobre o sensor óptico em alta velocidade. O Sensor SprintIR-6S 20% CO<sub>2</sub> emprega tecnologia óptica de LED de estado sólido NDIR (Infravermelho não dispersivo), permitindo uma rápida resposta às variações de CO<sub>2</sub>, mantendo alta precisão, essa precisão é de  $\pm 1\%$  do valor medido. Na Figura 2 pode-se ver um exemplo do sensor em questão.

Figura 2 – SprintIR®-6S-5 5% CO<sub>2</sub> Sensor.



Fonte: (SOLUTIONS, 2023).

Outro sensor de gás carbônico muito utilizado também é o sensor SCD30 da Sensirion que utiliza tecnologia NDIR para medir concentrações de CO<sub>2</sub>, possui também sensores de temperatura e umidade embutidos, e possui compensação automática de influências ambientais. Sua faixa de medição é de 400 - 10.000 ppm, com uma precisão de  $\pm 3\%$  do valor medido e um tempo de resposta de 20 segundos para o CO<sub>2</sub> com 63% de precisão. Outro modelo de sensor de gás carbônico é o K-33 da SenseAir, este também possui tecnologia NDIR, sua faixa de operação fica entre 0 - 5000 ppm (varia conforme o modelo), possui uma precisão de  $\pm 3\%$  do valor medido e seu tempo de resposta é de 20 segundos. Tem-se na Figura 3 um exemplo do modelo do sensor.

Figura 3 – K33 CO<sub>2</sub> Sensor SenseAir.

Fonte: (SENSEAIR, 2023).

### 2.3 MONITORAMENTO DE DADOS

Segundo (A. T. JOSEPH KURIEN; MANA, 2022) existem diversas ferramentas para monitoramento de dados como tecnologias web front-end (HTML, CSS, JavaScript, React) e banco de dados backend (MySQL, PHP, XAMPP Server, AJAX). Há diferentes tipos de banco de dados, cada um com uma finalidade diferente. Um deles é o banco de dados relacional, no qual usa o modelo de tabelas onde os dados são organizados em linhas e colunas, alguns exemplos de banco de dados relacional são: MySQL, PostgreSQL, Oracle Database, Microsoft SQL Server, SQLite.

O MySQL é um sistema de gerenciamento de banco de dados relacional que usa SQL (Structured Query Language). Geralmente usado como um banco de dados da web, ele pode conter desde uma única informação até um inventário completo de itens acessíveis.(A. T. JOSEPH KURIEN; MANA, 2022). Algumas das vantagens do MySQL é a alta performance pois possui desempenho eficiente, especialmente em operações de leitura, além de oferecer várias opções de otimização e ajuste de desempenho. Outra vantagem do MySQL é que ele possui uma instalação e configuração relativamente simples, além de que a versão Community do MySQL é gratuita e de código aberto. Ele também oferece ótimos recursos de segurança como autenticação e autorização baseada em senha, e SSL para conexões seguras. Dentre as desvantagens do MySQL pode-se citar limitações em aplicações de alta escala, em casos de crescimento vertical (adicionar mais recursos a um único servidor), o MySQL pode não escalar tão bem quanto alguns outros sistemas de banco de dados. Esse banco de dados usa replicação assíncrona por padrão, o que pode levar a inconsistências de dados em cenários de falha.

O PostgreSQL é um sistema de gerenciamento de banco de dados relacional de código aberto, e possui vasto conjunto de recursos avançados se comparado com o MySQL por exemplo. Ele oferece suporte completo a triggers e regras, permitindo a execução automática de funções complexas. Ele também permite tipos de dados personalizados como índices, e métodos de armazenamento, além de suporte a transações possuindo Controle de Concorrência Multiversion (MVCC), permitindo assim, transações simultâneas sem bloqueios, melhorando o desempenho.

Outro tipo de banco de dados é o Banco de dados NoSQL ou banco de dados não relacional, ele é utilizado para lidar com grande volume de dados não estruturados ou semi-estruturados e não utiliza de tabelas, alguns exemplos são MongoDB, Cassandra, Redis, Neo4j, entre outros.

O MongoDB é um banco de dados não relacional, orientado a documentos, que armazena dados em formato BSON (uma representação binária de JSON). Ele possui o objetivo de lidar com grandes volumes de dados e possui alta flexibilidade e escalabilidade. Uma das vantagens do MongoDB é sua escalabilidade, pois ele é projetado para escalar horizontalmente o que facilita a distribuição de dados e carga de trabalho em vários servidores através do sharding. Ele também suporta replicação, o que proporciona alta disponibilidade e recuperação de desastres. A consistência dos dados no MongoDB não é das melhores o que torna isso uma desvantagem pois ele utiliza um modelo de consistência eventual em clusters distribuídos, podendo assim resultar em leituras de dados desatualizados em alguns casos. Esse sistema é relativamente mais complexo de se entender devido a administração de clusters, especialmente em grandes implantações com sharding e replicação o que pode tornar uma desvantagem de se utiliza-lo caso não tenha um conhecimento previo do sistema.

O Apache Cassandra é um sistema de gerenciamento de banco de dados não relacional distribuído e orientado a colunas, projetado para lidar com grandes volumes de dados em várias máquinas sem pontos únicos de falha. É um projeto de código aberto que foi desenvolvido pelo Facebook e mantido pela Apache Software Foundation. Ele é muito utilizado para aplicações que exigem alta disponibilidade, escalabilidade e resiliência. Dentre suas vantagens pode-se citar: A sua distribuição geográfica, na qual ele pode ser configurado para operar em múltiplos datacenters, garantindo uma alta disponibilidade e resiliência a falhas. Ele também não possui ponto único de falha pois cada nó em um cluster Cassandra é igual, eliminando pontos únicos de falha e garantindo que a falha de um nó não afete a disponibilidade do sistema. Para usuários sem experiência em banco de dados distribuídos pode ser um desafio utilizar o cassandra pela primeira vez. Administrar e otimizar um cluster Cassandra pode ser complexo, exigindo conhecimento especializado e monitoramento constante. Dentre as desvantagens do Cassandra tem-se o armazenamento e a memória, pois pode exigir mais armazenamento e memória para manter altos níveis de performance e disponibilidade, especialmente em clusters grandes. Esse banco de dados



é otimizado para escrita, entretanto o desempenho de leitura pode não ser tão rápido quanto alguns outros bancos de dados.

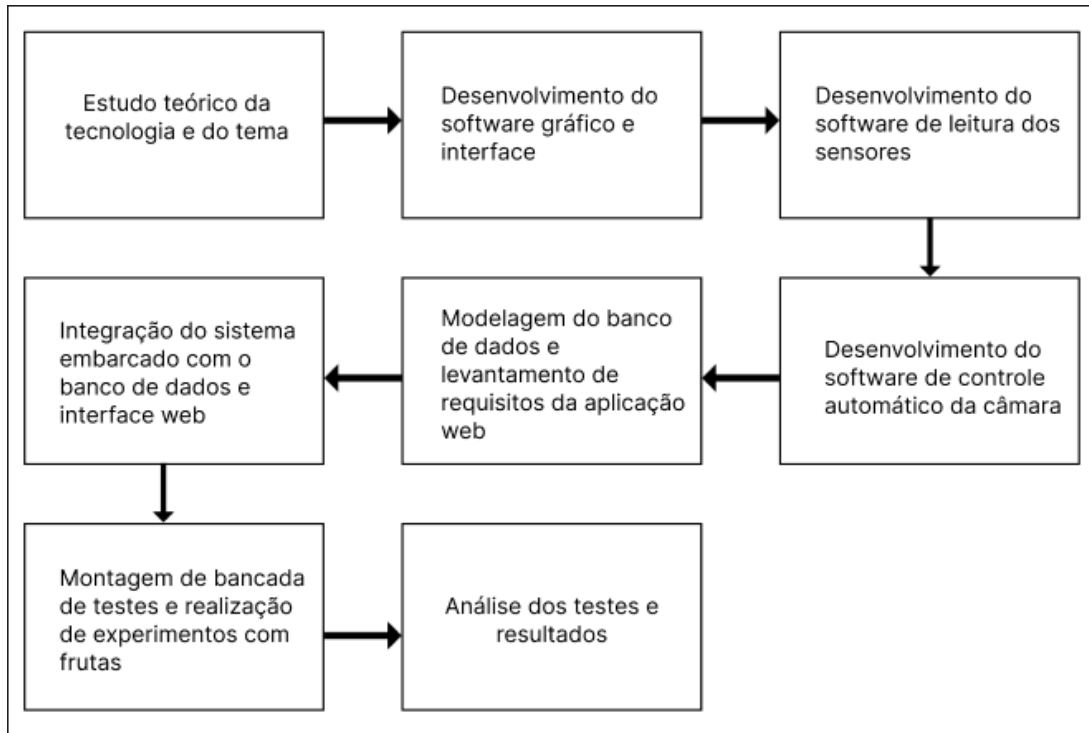
Aplicações web geralmente são utilizadas em monitoramento de dados devido à seu fácil acesso, apenas precisando de conexão a internet para acessar aos dados coletados. Um exemplo de utilização de aplicação web para análise de gases é o trabalho de (AL., R. C. et, 2011), Transmissão de sensor baseado na Web, utilizável para aplicações de monitoramento respiratório. Para isso foi utilizado um aplicativo de ponte pré-instalado e um navegador da web, os dados podem ser visualizados e transmitidos para um servidor central de streaming de sinal baseado na web para distribuição em tempo real aos usuários autorizados. Os usuários que desejam acompanhar os sinais respiratórios de determinado paciente, apenas necessitam de acesso à um navegador web e da URL do paciente em questão.

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho é organizada em oito etapas, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autor.

A primeira etapa consiste em fazer uma pesquisa bibliográfica sobre a tecnologia que foi utilizada no trabalho, com foco na agricultura de precisão e suas necessidades.

Na segunda etapa foi modelada a interface gráfica e desenvolvida juntamente com o software gráfico e as funções necessárias para a agricultura de precisão.

Na terceira etapa foi desenvolvido o software de leitura dos sensores, onde ocorre a comunicação entre os sensores, o Raspberry Pi e o display.

Na quarta etapa, foi desenvolvido o software responsável pelo controle automático dos gases da câmara por meio das eletroválvulas instaladas no sistema. O sistema tem um modo de operação e três acionamentos diferentes, que são ativados conforme a necessidade atual do sistema. O modo de operação consiste na leitura contínua do sistema, onde uma bomba de ar é acionada para circular o ar da câmara e direcioná-lo aos sensores, permanecendo ativa durante todo o processo. Um dos acionamentos é para a "redução de CO<sub>2</sub>". Duas eletroválvulas são abertas para permitir a circulação do gás por um tubo contendo cal, substância adsorvente de CO<sub>2</sub>. Outro acionamento é o de "redução de O<sub>2</sub>", duas eletroválvulas são ativadas, uma para a injeção de nitrogênio e outra para o alívio da

pressão do sistema enquanto o nitrogênio é introduzido. Há também o acionamento para o "aumento de O<sub>2</sub>", uma eletroválvula é aberta para permitir a entrada de ar atmosférico por um tempo determinado, elevando assim o nível de O<sub>2</sub> no sistema.

Após isso tem-se a quinta etapa na qual foi modelado o banco de dados juntamente com o levantamento de requisitos necessários para a aplicação web do trabalho.

Na sexta etapa foi integrado o banco de dados e a interface web no software dos sensores e realizado testes de envio de dados.

Na sétima etapa foi montada a bancada de testes para a realização dos experimentos com frutas.

Na oitava etapa foi analisado os testes feitos na bancada e coletado os resultados obtidos. Foi avaliado o controle dos gases feito pelo sistema de forma a verificar se os gases O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> estão se mantendo na margem determinada.

### 3.2 ESTUDO TEÓRICO DA TECNOLOGIA E DO TEMA

O desenvolvimento de sistemas computacionais embarcados para o controle de atmosfera em ambientes de armazenamento pós-colheita de frutas é uma abordagem capaz de estender a vida útil e manter a qualidade dos produtos. O controle da concentração de gases como oxigênio (O<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é fundamental para reduzir o metabolismo das frutas, evitando perdas e promovendo uma maior durabilidade.

Na Figura 5, é apresentado um exemplo de armazenamento refrigerado, no qual as frutas estão acondicionadas em caixas dentro de um ambiente fechado e mantido a baixas temperaturas.

Figura 5 – Armazenamento Refrigerado.



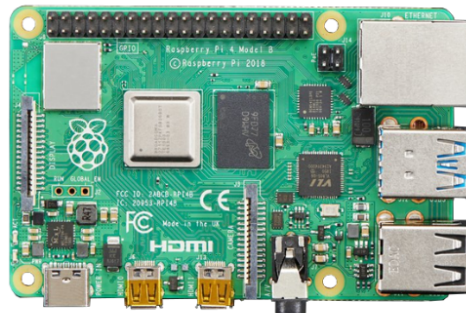
Fonte: <https://blog.zanottirefrigeracao.com.br>

O armazenamento refrigerado é fundamental no controle de atmosfera para frutas,

pois reduz seu metabolismo ao diminuir a temperatura do ambiente, permitindo que elas precisem inspirar menos. Com isto é possível aplicar a técnica chamada de "Atmosfera Controlada" na qual diminui a concentração de oxigênio e aumenta a concentração de dióxido de carbono dentro do ambiente refrigerado. Essa técnica prolonga a vida útil das frutas e preserva sua qualidade.

Para a implementação deste controle atmosférico, foi escolhido o sistema computacional embarcado Raspberry Pi 4 Model B (exemplo na Figura 6) devido ao seu custo-benefício e às especificações adequadas para a análise, monitoramento e controle de sensores em tempo real. Este modelo de Raspberry Pi oferece um processamento eficiente para o funcionamento do projeto, além das interfaces I<sup>2</sup>C e serial, necessárias para a comunicação com sensores e atuadores no sistema.

Figura 6 – Raspberry pi 4 model B.



Fonte: <https://www.robocore.net/placa-raspberry-pi/raspberry-pi-4-4gb>

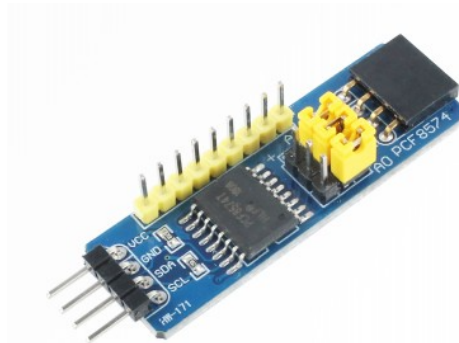
No que diz respeito à análise de gases, o projeto utiliza o sensor K33 da SenseAir para a medição de CO<sub>2</sub>. Este sensor possui a tecnologia NDIR (Infravermelho não dispersivo), oferece uma boa precisão para leituras em fluxo em tubulações e tem um custo mais acessível em comparação ao sensor SprintIR-6S-5, que, embora realize até 20 leituras por segundo, possui um valor significativamente mais alto. No caso deste projeto, o sensor K33 é suficiente, pois uma amostragem de ao menos uma leitura a cada cinco segundos atende às necessidades do sistema. Ambos os sensores possuem uma durabilidade de até 15 anos (por serem infravermelhos), tornando-os adequados para uso prolongado.

Para o monitoramento de O<sub>2</sub>, o sistema conta com o sensor eletroquímico AO2 da Citicel, que é capaz de realizar leituras precisas a cada cinco segundos. Como é típico em sensores eletroquímicos, o AO2 possui uma vida útil de aproximadamente dois anos em condições de ar fresco.

No controle dos níveis de gases, o sistema utiliza relés de estado sólido, acionados através do expansor de portas I<sup>2</sup>C PCF8574 (Demonstrado na Figura 7), para controlar as válvulas solenóides responsáveis pelo ajuste da atmosfera (INSTRUMENTS, 2023). A escolha pelos relés de estado sólido foi feita para minimizar o ruído das bobinas das válvulas,

o que melhora a consistência do sinal que o PCF8574 envia para os relés, garantindo maior estabilidade na comunicação e no controle dos dispositivos. Além disso, foi incorporado o isolador capacitivo ISO1540 entre o Raspberry Pi e as conexões I<sup>2</sup>C, especificamente para isolar interferências elétricas provenientes das bobinas dos relés em direção ao expansor PCF8574 e, conseqüentemente, ao Raspberry Pi. Essa medida protege o sistema contra ruídos gerados pelas válvulas e possíveis problemas com os sensores na interface I<sup>2</sup>C, aumentando a segurança e a robustez da comunicação entre os dispositivos.

Figura 7 – PCF 8574.



Fonte: <https://www.amazon.com.br/PCF8574T-expans%C3%A3o-Expander-desenvolvimento-avalia%C3%A7%C3%A3o/dp/B07XD2K4GH>

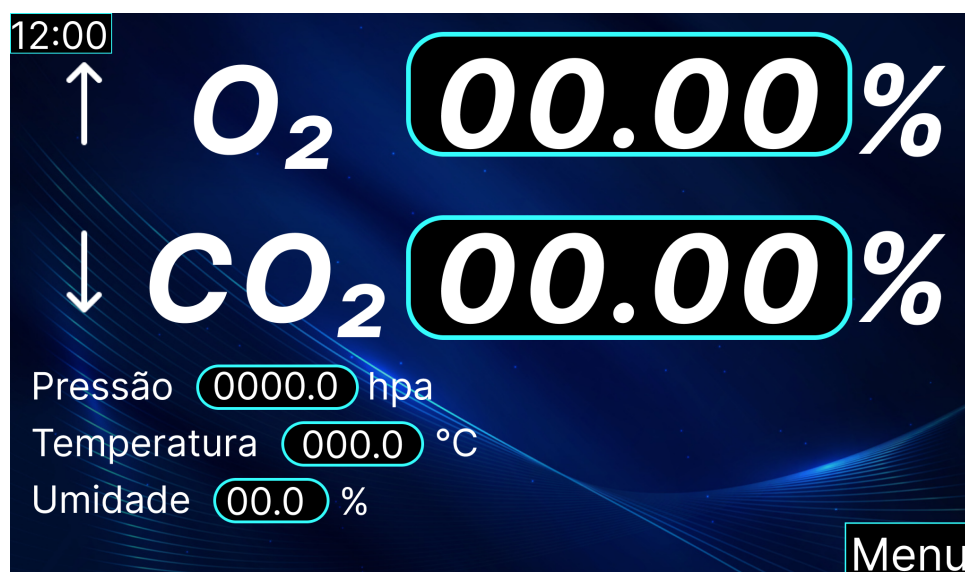
### 3.3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE GRÁFICO E INTERFACE

O software gráfico do sistema, juntamente com todo o código do projeto, foi desenvolvido em Python, utilizando a biblioteca Tkinter para a criação da interface gráfica. A escolha do Tkinter foi motivada por sua flexibilidade na criação de telas com botões e funcionalidades que suportam uma interface multitelas.

O design da interface gráfica foi planejado e prototipado no Figma, ferramenta escolhida para o desenvolvimento de uma interface de alta qualidade gráfica. No Figma, as telas foram projetadas com foco na usabilidade e na praticidade, especialmente em relação à funcionalidade de calibração dos sensores, que é crucial para a precisão do sistema. Uma das vantagens do uso do Tkinter é a possibilidade de importar automaticamente o design criado no Figma diretamente para o código Python, simplificando a implementação visual e mantendo o padrão de layout projetado. Na Figura 8, pode-se observar o design da tela principal da interface gráfica.

Ao observar a Figura 8, nota-se que a tela principal da interface gráfica exibe informações detalhadas sobre os níveis de oxigênio (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), pressão barométrica(hpa), temperatura(°C) e umidade(%). Além desses dados, a interface apresenta o horário atual e um botão de acesso ao menu principal. Adicionalmente, são

Figura 8 – Interface da tela principal.



Fonte: Autor.

visíveis setas de tendência ao lado das indicações de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, as quais mostram a direção esperada dos valores desses gases, indicando de forma intuitiva, se a concentração está em elevação ou declínio em relação às medições anteriores.

A interface gráfica foi configurada para a resolução de 1024x600 pixels, que corresponde à resolução do display touch de 7 polegadas DWIN HDW070-008LZ02. Este display foi selecionado por sua compatibilidade com o Raspberry Pi e sua tela grande e sensível ao toque, o que facilita a interação com o sistema e garante que todas as informações e controles sejam exibidos de maneira clara e acessível para o usuário. Na Figura 9 é possível visualizar o modelo do display utilizado.

### 3.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE LEITURA DOS SENSORES

O desenvolvimento do software de leitura dos sensores foi implementado em Python, utilizando as comunicações I<sup>2</sup>C e serial para interagir com os diversos sensores integrados ao sistema.

Um dos sensores utilizados é o BME280, que realiza leituras de temperatura, pressão barométrica e umidade (SENORTEC, 2023). A comunicação com o Raspberry Pi é estabelecida via I<sup>2</sup>C, utilizando o endereço 0x76. Devido à natureza estável das leituras de pressão barométrica ao longo do dia, o sistema foi configurado para coletar 60 leituras (uma por segundo) a cada 5 minutos. Essas leituras são então processadas para calcular a média, o que atua como um "filtro digital", minimizando a margem de erro das medições que pode ser causada pela interferência elétrica na qual poderia afetar os resultados.

Outro sensor é o AO<sub>2</sub>, que é um sensor eletroquímico de oxigênio. Ele apresenta

Figura 9 – DWIN Touch Display HDW070-008LZ02.



Fonte: (SO, 2024).

uma tensão interna muito baixa e não possui uma tensão de entrada VCC (HONEYWELL, 2023). Para melhorar a confiabilidade das leituras, o sensor foi acoplado a um conversor ADS1115 (ilustrado na Figura 10), que também se comunica via I<sup>2</sup>C, utilizando o endereço 0x48 (ADAFRUIT, 2023). O sistema está configurado para realizar uma leitura a cada 5 segundos. No entanto, para garantir que os dados exibidos sejam atualizados continuamente e de forma confiável, o sensor é programado para coletar 12 leituras a cada 5 segundos, calculando a média dessas leituras. Para evitar atrasos significativos na atualização dos valores exibidos, o sistema, assim que iniciado, implementa um mecanismo de *warming-up*. Durante este processo, o sistema realiza as primeiras 12 leituras e exibe na tela, após isso ele irá descartar a primeira leitura da lista das 12 e insere uma nova leitura, garantindo assim que a cada 5 segundos o display receba uma nova atualização.

Além desses, o sensor K33 da SenseAir foi integrado para medir a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (SENSEAIR, 2023). Este sensor utiliza comunicação serial (UART) com o Raspberry Pi e requer uma fonte de alimentação VCC alternativa entre 6V e 14V. Configurado para realizar uma leitura a cada 5 segundos, o sensor K33 emprega o mesmo sistema de média móvel do AO2: ele inicialmente realiza 12 leituras, e depois disso descarta a leitura mais antiga e adiciona uma nova a cada 5 segundos, garantindo atualização contínua.

Na Figura 11, é apresentado o esquema do hardware do sistema. Observa-se que o sistema conta com quatro fontes de alimentação distintas:

Figura 10 – ADS 1115.



Fonte: <https://www.wjcomponents.com.br/shields/modulo-conversor-analogico-digital-ads1115>.

Uma fonte de 5V destinada à alimentação do Raspberry Pi 4;

Uma fonte de 12V que alimenta o display de 7 polegadas;

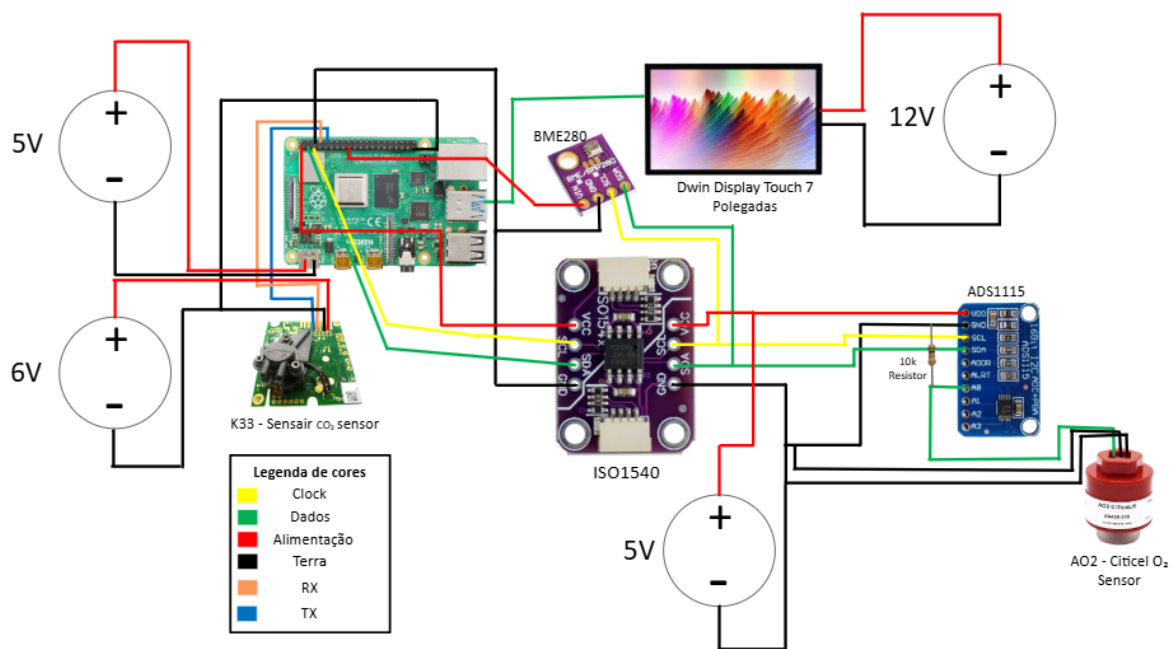
Uma fonte de 6V para o sensor K33 da SenseAir;

Outra fonte de 5V que alimenta o isolador ISO1540 e o ADS1115.

O isolador ISO1540 é um dispositivo capacitivo que utiliza capacitores para transferir informações de sinal através de uma barreira de isolamento, bloqueando completamente a passagem de corrente contínua. Esse componente é projetado para proteger sistemas eletrônicos contra problemas elétricos, garantindo a segurança do hardware conectado. Caso ocorram alterações ou falhas elétricas em uma parte do sistema, o ISO1540 isola



Figura 11 – Hardware.



Fonte: Autor.

completamente essa seção da outra, preservando os componentes do lado mestre mesmo que a parte escrava sofra danos. Isso o torna uma solução eficaz para mitigar os impactos de surtos ou falhas no sistema.

A análise da Figura 11 e sua legenda revela os diferentes tipos de comunicação utilizados no sistema:

O sensor K33 se comunica via UART (RX/TX);

O sensor BME280 e o ADS1115 utilizam comunicação via I<sup>2</sup>C;

O sensor AO2 apenas envia dados, não havendo comunicação bidirecional com o sistema.

O display LCD comunica a funcionalidade de touch via interface serial.

Internamente, o dispositivo possui um conversor de serial para USB, sendo conectado diretamente à porta USB padrão do Raspberry Pi.

Ao olhar para a Figura 11, pode-se analisar que o sensor BME280 e o lado esquerdo do ISO1540 são alimentados com 3,3V provenientes do Raspberry Pi, enquanto o ADS1115 e o lado direito do ISO1540 recebem alimentação de 5V de uma fonte externa. O ISO1540, por sua vez, possui dois lados isolados, cada um com sua própria alimentação (Vcc e GND), garantindo um isolamento completo entre as duas seções do circuito. Essa característica permite maior segurança e confiabilidade ao sistema, protegendo-o contra falhas ou interferências provenientes de surtos elétricos.

Para abordar o tema das leituras dos sensores, é essencial considerar a compensação

de pressão e as calibrações necessárias antes de sua utilização na aplicação. Nesse contexto, a Equação 1, apresentada a seguir, é empregada para realizar a compensação da pressão barométrica, que influencia diretamente as leituras do sensor K33. Essa fórmula ajusta a leitura bruta do sensor de CO<sub>2</sub>, considerando a pressão barométrica atual fornecida pelo sensor BME280. O valor da pressão barométrica é subtraído de 100, referência correspondente à pressão ao nível do mar em kilopascal:

$$\text{Leitura de CO}_2 \times (1 - 0,016 \times (\text{Pressão bar atual} - 100))$$

Esse ajuste é feito antes de qualquer calibração para obter os valores corretos nas calibrações. Para uma melhor calibração e melhores leituras, é utilizado um tipo de calibração chamada de calibração em dois pontos. Nesse método, o sensor é ajustado em dois valores de referência distintos para garantir a precisão dentro de uma faixa de valores específica. Primeiro, o sensor é calibrado para 0% de CO<sub>2</sub> utilizando nitrogênio, que serve para definir o ponto de zero da escala, assegurando que a leitura em um ambiente sem CO<sub>2</sub> seja precisa. Em seguida, é feita uma calibração com ar fresco (0,04% de CO<sub>2</sub>) ou com um gás de concentração conhecida. Essa segunda etapa ajusta o sensor para um ponto superior na escala, permitindo que a calibração seja precisa em toda a faixa de valores entre o zero e a concentração calibrada.

Dessa forma, a calibração em dois pontos melhora significativamente a precisão das leituras do sensor em todo o intervalo de medição.

No caso do sensor K33, ele já permite calibrações internas com ar fresco e nitrogênio. No entanto, como não possui suporte para calibração com gás de concentração conhecida, foi implementada uma forma de realizar essa calibração adicional utilizando a Equação 2:

$$\text{Fator de Calibração CO}_2 : \frac{\text{Valor a ser calibrado}}{\text{Leitura Atual do Sensor de CO}_2}$$

Nessa fórmula, para obter o fator de calibração de CO<sub>2</sub> para um gás conhecido, o valor específico escolhido pelo usuário para calibrar é dividido pela leitura atual do sensor de CO<sub>2</sub>. Esse fator, então, é multiplicado pela leitura subsequente do sensor, de modo que o valor resultante corresponda ao valor especificado durante a calibração, enquanto a leitura atual do sensor permanecer igual à de quando a calibração foi realizada. Isso garante que as leituras sejam ajustadas corretamente para refletir a concentração de CO<sub>2</sub> desejada. O fator de calibração do CO<sub>2</sub> é salvo em um arquivo no formato JSON, pois isso garante que, em caso de queda do sistema, falta de energia ou qualquer problema elétrico, o fator continue salvo de forma externa ao código. Dessa forma, quando o sistema for reiniciado, ele terá acesso ao fator de calibração previamente salvo, mantendo a consistência e a precisão das leituras desde o início da operação.

A cada leitura do sensor, o sistema consulta o arquivo no formato JSON para verificar o valor do fator de calibração e aplica essa correção na leitura de CO<sub>2</sub>. Inicialmente, o fator é definido como 1, até que uma calibração com gás de concentração conhecida

seja realizada, momento em que o novo fator é calculado, atualizado e salvo no arquivo. Isso assegura que as leituras sejam continuamente ajustadas e precisas, mesmo após interrupções.

No caso do sensor de oxigênio AO2, uma compensação de pressão barométrica também é necessária, pois ele não realiza essa compensação internamente. A fórmula utilizada para calcular essa diferença é representada pela Equação 3:

$$\text{Diferença de pressão} : \frac{\text{Pressão atual} - \text{Pressão do nível do mar}}{\text{Pressão do nível do mar}}.$$

Nesta fórmula, a diferença de pressão é calculada subtraindo a pressão do nível do mar (1013.2 hPa) da pressão atual (lida pelo sensor BME280) e dividindo o resultado pela pressão do nível do mar. Essa diferença é então usada para ajustar a leitura do oxigênio.

A leitura do O<sub>2</sub> compensado é feita pela Equação 4:

$$\text{Leitura O}_2 : \text{Leitura O}_2 \text{ não compensado} \times (1 - \text{Diferença de pressão}).$$

Nesta equação, a leitura de O<sub>2</sub> compensada é obtida multiplicando a leitura bruta (não compensada e não calibrada) do sensor de oxigênio pelo fator (1 - Diferença de Pressão). O sensor AO2 da Citicel possui uma variação proporcional à pressão atmosférica em relação ao nível do mar. Isso significa que, se o sensor estiver em um ambiente com uma pressão 10% acima do nível do mar, a leitura de O<sub>2</sub> variará 10% para cima. Da mesma forma, se o sensor estiver em um ambiente com uma pressão 10% abaixo do nível do mar, a leitura variará 10% para baixo. As equações de compensação garantem que, em ambientes 10% acima do nível do mar, o valor de O<sub>2</sub> seja reduzido em 10%, e em ambientes 10% abaixo do nível do mar, o valor de O<sub>2</sub> seja aumentado em 10%, assegurando leituras precisas e ajustadas à pressão ambiente.

Quanto à calibração, o sensor AO2 não possui comandos para comunicação bidirecional; ele apenas transmite dados e não recebe instruções. Assim, a calibração é feita por meio de fórmulas, adotando o método de calibração em dois pontos: primeiro com nitrogênio, para obter o offset do sensor, e em seguida com ar fresco ou gás conhecido, criando dois pontos de referência.

Para o cálculo do valor de O<sub>2</sub>, o software aplica a seguinte lógica, que é executada a cada leitura do sensor:

Quando o fator de calibração do O<sub>2</sub> é igual a 1 (padrão), o valor de O<sub>2</sub> é calculado pela Equação 5:

$$\text{Leitura compensada e calibrada} : \text{Leitura O}_2 \text{ (compensada e não calibrada)} - \text{offset O}_2.$$

Esta fórmula ajusta a leitura do sensor pela pressão barométrica e subtrai o offset. O offset é o ajuste feito na calibração com nitrogênio, garantindo que as leituras com 0% de O<sub>2</sub> sejam corretamente alinhadas.

Quando o fator de calibração é diferente de 1 (indicando que uma calibração foi feita com gás conhecido ou ar fresco), o valor de  $O_2$  é ajustado conforme a Equação 6:

Leitura compensada e calibrada :  $(\text{Leitura } O_2 \text{ compensada e não calibrada} - \text{offset } O_2) \times \text{fator calibra}$

Esta fórmula aplica a leitura do sensor compensada pela pressão barométrica e subtrai o offset calculado na calibração com nitrogênio. O resultado é multiplicado pelo fator de calibração do  $O_2$ , calculado em uma calibração com ar fresco ou gás conhecido.

O fator de calibração do ar fresco é calculado pela Equação 7:

$$\text{Fator calibração } O_2 \text{ ar fresco : } \frac{20,90}{\text{Valor atual } O_2 \text{ (compensado e não calibrado)} - \text{Offset } O_2},$$

Nesta fórmula, 20,90 representa a concentração padrão de oxigênio no ar fresco em porcentagem. O fator de calibração é obtido dividindo esse valor pela leitura atual do sensor compensada pela pressão menos o offset calculado na calibração com nitrogênio.

Para a calibração com gás conhecido, a fórmula é a Equação 8:

$$\text{fator calibração } O_2 \text{ gás conhecido : } \frac{\text{Valor } O_2 \text{ específico}}{\text{Valor atual } O_2 \text{ (compensado e não calibrado)} - \text{Offset } O_2}.$$

Nesta fórmula, o fator de calibração é calculado dividindo o valor específico de  $O_2$  desejado pelo usuário pela leitura atual do sensor compensada pela pressão menos o offset. Isso permite que o sistema corrija as leituras do sensor para corresponder ao valor especificado pelo usuário.

Essas etapas garantem que as leituras dos sensores sejam precisas e adaptadas às variações do ambiente, fundamentais para um controle de atmosfera eficiente em pós-colheita.

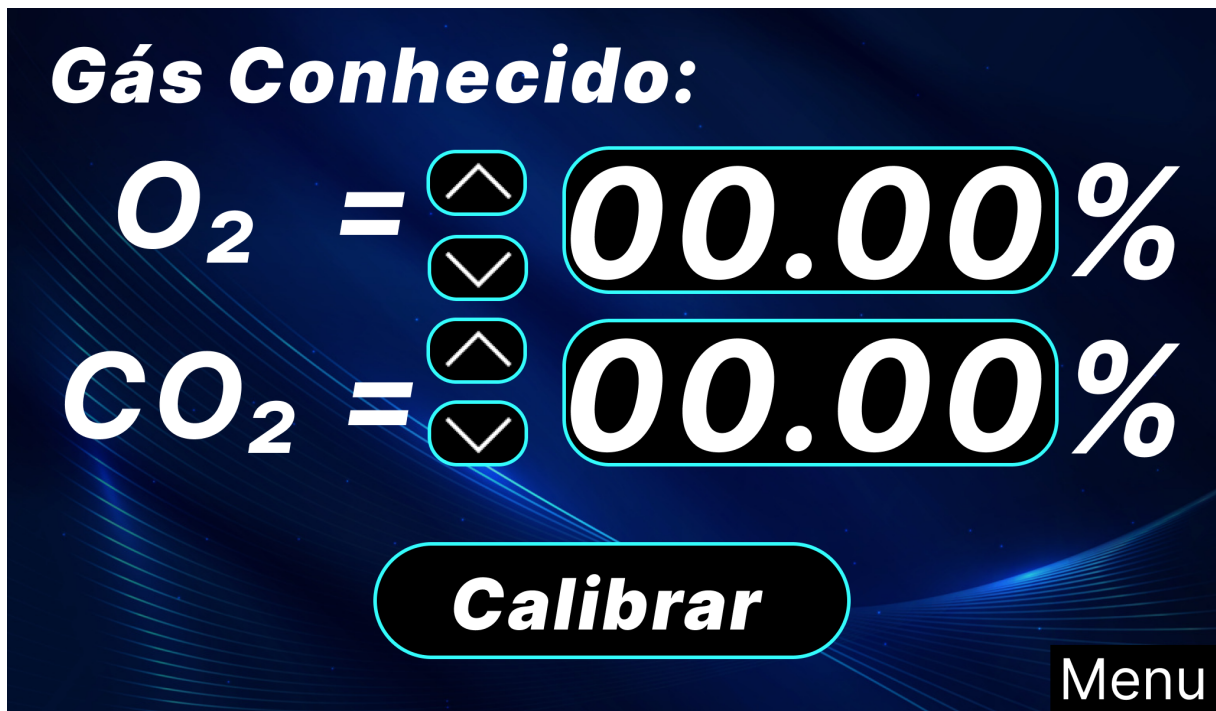
Na Figura 12 pode-se visualizar a interface de calibração dos sensores com gás conhecido, onde o usuário pode definir o valor desejado para ambos os sensores ao mesmo tempo.

### 3.5 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE CONTROLE AUTOMÁTICO DA CÂMARA

Com a técnica de controle elementar chamada de controle ON/OFF, o software de controle da câmara monitora continuamente as porcentagens de oxigênio ( $O_2$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) dentro do ambiente. A cada segundo, o sistema realiza leituras dos níveis de  $O_2$  e  $CO_2$  e toma decisões com base nos valores medidos em relação a um *setpoint* predefinido. No entanto, ao invés de simplesmente ligar ou desligar os relés com base nos limites de  $O_2$  e  $CO_2$ , o sistema utiliza uma regra de 3 para determinar o tempo de acionamento de cada relé, de modo a otimizar o processo e permitir que os gases se aproximem de forma mais eficiente do *setpoint* desejado.

Além disso, é importante entender o conceito de histerese para o controle da câmara. Basicamente, a histerese é a tolerância do *setpoint* definido, onde, caso o valor do sensor

Figura 12 – Interface de calibração dos sensores com gás conhecido.



Fonte: Autor.

varie para cima ou para baixo dentro dessa faixa entre o setpoint e a histerese, nenhuma ação será realizada. Isso ocorre porque essa variação é considerada normal pelo sistema, evitando acionamentos desnecessários e melhorando a estabilidade do controle.

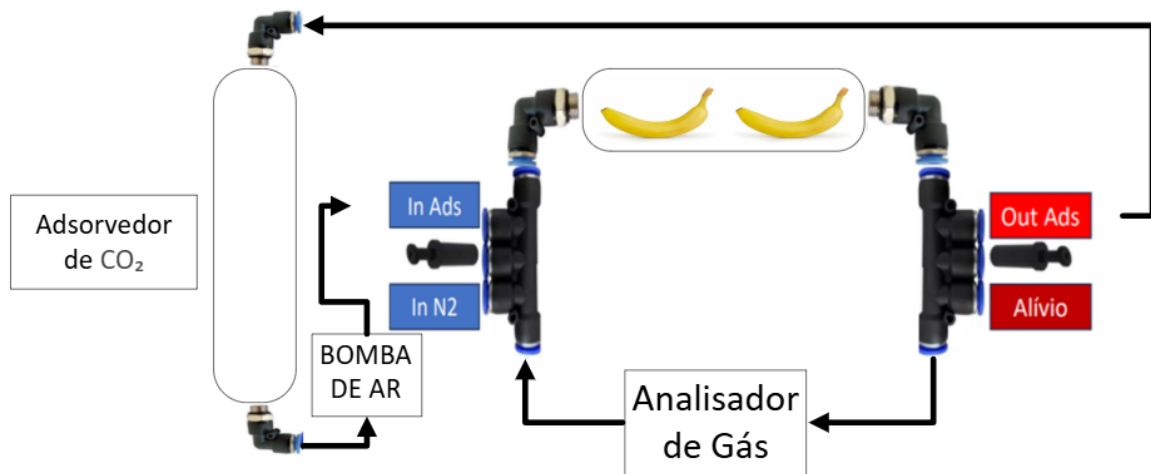
Na Figura 13 pode-se analisar a Bancada de testes e como funciona o fluxo do sistema.

Na Figura 13, o sistema "principal" refere-se ao analisador de gás e ao ciclo fechado de circulação de ar entre ele e a câmara com as frutas. Esse ciclo é controlado pelo software, que aciona as eletroválvulas conforme necessário para ajustar os níveis de gases. As entradas são reguladas pelos seguintes componentes: o "Alívio" é controlado pelo relé 1, que ativa a eletroválvula 1; o "Out Ads" pelo relé 2, responsável pela eletroválvula 2; o "In N2" pelo relé 3, que aciona a eletroválvula 3; e o "In ADS" pelo relé 4, que controla a eletroválvula 4. Além disso, a bomba de ar é gerenciada pelo relé 5.

No sistema de controle, caso o nível de oxigênio ultrapasse o *setpoint* mais a histerese, o sistema entrará no acionamento **Abaixar O<sub>2</sub>** e se comunicará com o PCF8574, enviando um dado de 8 bits, onde cada bit controla o estado de uma saída. Especificamente, as válvulas 1 e 3 serão ativadas: a válvula 1 abrirá a câmara para a atmosfera, aliviando a pressão, enquanto a válvula 3 injetará nitrogênio no ambiente. Esse procedimento reduz os níveis de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> na câmara, estabilizando a atmosfera interna.

Por outro lado, se o oxigênio estiver abaixo do *setpoint* menos a histerese, o sistema entrará no acionamento **Aumentar O<sub>2</sub>**, enviando um comando ao PCF8574 para acionar

Figura 13 – Bancada de Testes.



Fonte: Autor.

apenas o relé 1, que abrirá a câmara para a atmosfera, permitindo a entrada de ar fresco e elevando a porcentagem de oxigênio no interior.

Além disso, se a concentração de CO<sub>2</sub> estiver acima do *setpoint* mais a histerese, o sistema entrará no acionamento **Abaixar CO<sub>2</sub>** e ativará os relés 2, 4 e 5. Isso acionará as eletroválvulas responsáveis por empurrar o ar da câmara para um ambiente contendo cal (um adsorvedor de CO<sub>2</sub>) e puxar o ar do ambiente com cal de volta para a câmara. O relé 5, ao ser acionado, ativará uma bomba de ar que auxiliará nesse processo de troca de ar, garantindo a redução dos níveis de CO<sub>2</sub>.

Após cada acionamento, o sistema manterá o acionamento ativo por um tempo determinado. Esse tempo é calculado por meio de uma regra de 3, onde são utilizados valores de referência para o oxigênio (O<sub>2</sub>) ou dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Esses valores de referência foram determinados com base em testes de bancada, observando quantos segundos eram necessários para alterar 1% do gás em questão. A fórmula para calcular o tempo de acionamento é baseada na diferença entre o valor atual do gás e o valor de *setpoint* desejado, conforme apresentado na Equação 9:

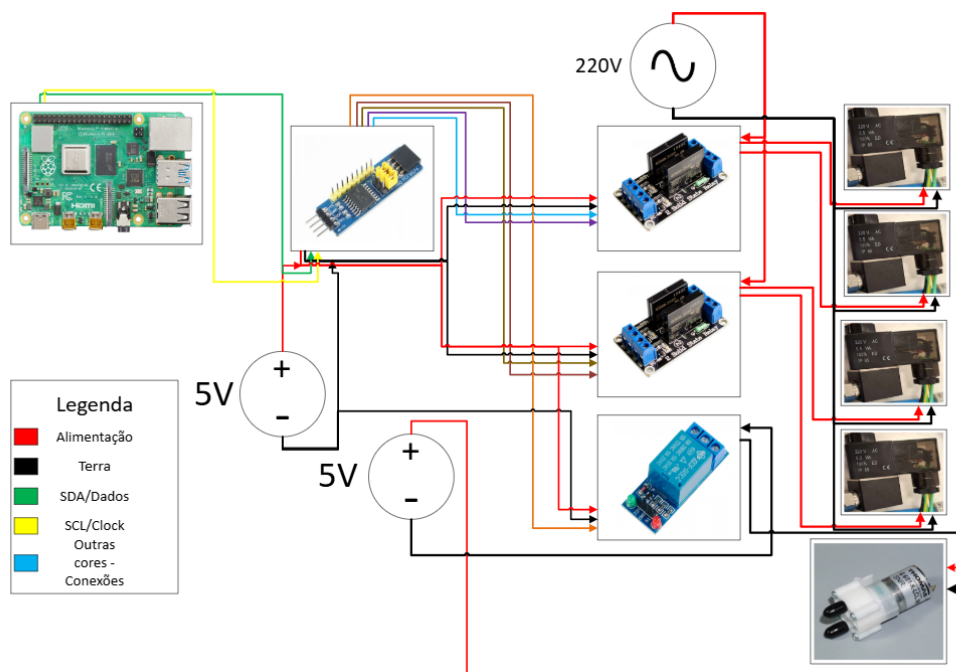
$$\text{Tempo Acionamento} : \frac{(\text{Valor O}_2 - \text{Setpoint}) \times \text{Tempo Base}}{\text{Porcentagem Base}}$$

De acordo com essa fórmula, o tempo de acionamento será maior quanto mais distante o valor de O<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub> estiver do *setpoint*, e menor será o tempo quanto mais próximo estiver do *setpoint*. O objetivo desse cálculo é maximizar o tempo de acionamento, permitindo que os gases se aproximem do valor desejado de maneira mais eficiente. Uma vez alcançado o tempo determinado de acionamento, o software enviará um comando para

o PCF8574 desligar todos os relés e, então, fará uma pausa no sistema de controle para homogeneizar os gases. A homogeneização é crucial para garantir que a distribuição dos gases dentro da câmara seja uniforme. Esse processo assegura que todos os pontos da câmara tenham a mesma porcentagem de  $O_2$  e  $CO_2$ , permitindo que os sensores realizem leituras precisas e representativas de todo o ambiente. Caso o sistema não aguarde a homogeneização completa, os sensores podem captar variações nos níveis de gases em regiões da câmara que ainda não estejam equilibradas, o que poderia levar a acionamentos inadequados ou imprecisos. Após a homogeneização, o sistema retornará ao seu estado inicial, apenas circulando o ar e realizando a leitura dos sensores até que uma nova ação seja necessária.

Na Figura 14, é apresentada a montagem do sistema elétrico dos relés. Observa-se que o Raspberry Pi 4 se comunica com o PCF 8574 por meio do protocolo I<sup>2</sup>C, sendo que o PCF é alimentado por uma fonte externa de 5V. O PCF, por sua vez, transmite os dados recebidos via I<sup>2</sup>C em sua saída de 8 bits, atribuindo 1 bit para cada relé. As saídas de 1 a 4 são responsáveis por acionar os relés que ativam as válvulas solenóides, enquanto a saída 5 aciona o relé que ativa uma bomba de ar. As eletroválvulas são conectadas a uma rede de 220V em corrente alternada, e a bomba de ar é alimentada por uma fonte separada de 5V.

Figura 14 – Sistema elétrico dos atuadores.



Fonte: Autor.

### 3.6 MODELAGEM DO BANCO DE DADOS E LEVANTAMENTO DE REQUISITOS DA APLICAÇÃO WEB

O banco de dados foi modelado de forma escalonável, permitindo o crescimento conforme a evolução do projeto. Foi utilizado o banco de dados relacional PostgreSQL. A seguir, são apresentadas as tabelas e suas respectivas funcionalidades:

Tabela Atuadores: contém os atributos nome do atuador, endereço, id do atuador, data de cadastro e pino de conexão.

Tabela Acionamento: inclui os atributos id do acionamento, status do atuador, horário de início do acionamento, horário de término do acionamento e origem do acionamento (motivo do acionamento).

Tabela Controle: possui os campos id do controle, chave estrangeira do acionamento, chave estrangeira da câmara e chave estrangeira do atuador. Essa tabela faz a relação entre acionamentos e câmaras, permitindo a inclusão de múltiplas câmaras no projeto e relacionando os atuadores com os acionamentos. Há um id de controle para cada atuador diferente em um acionamento específico.

Tabela Sensor: contém os campos nome do sensor, endereço do sensor, id do sensor, pino de conexão, data de cadastro e unidade de medida.

Tabela Câmara: possui os atributos nome da câmara, chave estrangeira da fruta, capacidade da câmara, id da câmara e status da câmara (1 para ativa e 0 para inativa).

Tabela Usuário: contém os campos id do usuário, nome do usuário, cargo e status do usuário.

Tabela Fruta: inclui os atributos nome da fruta, *setpoint* de O<sub>2</sub> (nível de oxigênio definido para a fruta), *setpoint* de CO<sub>2</sub>, temperatura, umidade, id da fruta e fornecedor.

Tabela Varredura Sensores: é atualizada constantemente e contém os campos id da varredura, horário da varredura, chave estrangeira da câmara, chave estrangeira da fruta, valor de O<sub>2</sub>, valor de CO<sub>2</sub>, temperatura do painel, umidade e pressão barométrica.

Na Figura 15 é possível analisar o diagrama de entidade-relacionamento do banco de dados.

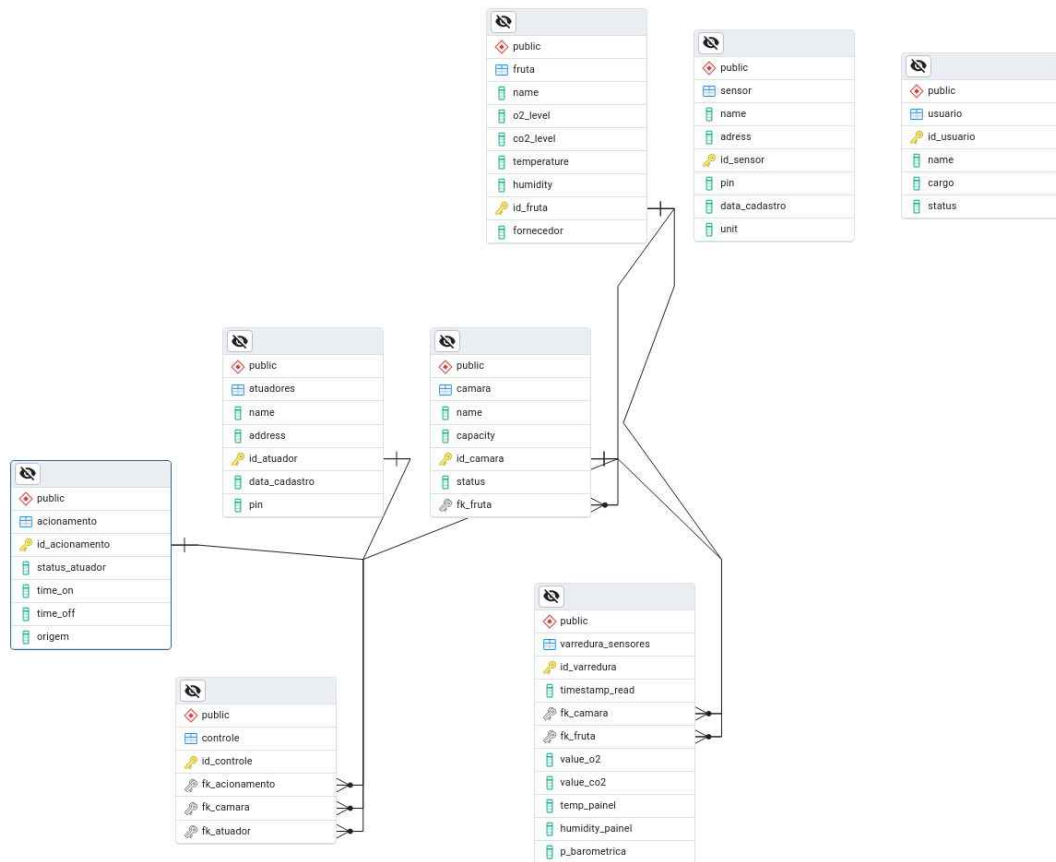
O objetivo principal da aplicação web é permitir a visualização dos dados coletados pelo sistema a qualquer distância, garantindo a acessibilidade das informações. Para isso, a aplicação requer apenas um sistema de login com usuário e senha para controle de acesso, de modo a garantir a segurança e integridade dos dados.

A aplicação web deve apresentar as últimas medições de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. Para atender a essa necessidade, foram implementadas quatro representações visuais na interface:

Dois gráficos de linha: exibem a evolução dos valores de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> ao longo do tempo, permitindo a análise do histórico das medições. Dois gráficos de valores atuais: apresentam o valor atual de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> em comparação com o valor máximo registrado no sistema, facilitando a compreensão da situação em tempo real. Ao acessar o link do site, o usuário é direcionado a uma interface de login e senha. Após a autenticação bem-



Figura 15 – Diagrama de entidade-relacionamento do banco de dados.



Fonte: Autor.

sucedida, o dashboard com os gráficos baseados na leitura do banco de dados é exibido, proporcionando uma visualização intuitiva e eficiente dos dados coletados.

### 3.7 INTEGRAÇÃO DO SISTEMA EMBARCADO COM O BANCO DE DADOS E INTERFACE WEB

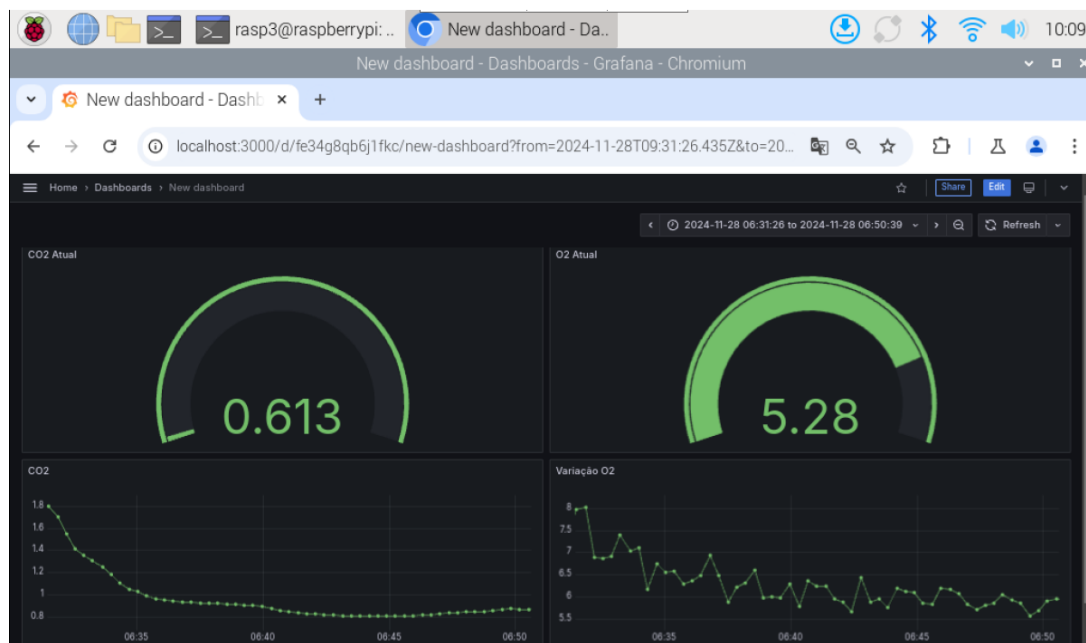
O banco de dados e a interface web estão instalados localmente no Raspberry Pi, de forma que ambos operam diretamente no dispositivo. O sistema embarcado realiza a leitura e a atualização frequente do banco de dados PostgreSQL, armazenando os dados obtidos pelos sensores e os acionamentos realizados.

A interface web foi implementada utilizando o Grafana, que está instalado e configurado no Raspberry Pi para inicializar automaticamente a página local assim que o dispositivo for ligado. Para permitir o acesso à página fora do ambiente local, foi instalado o Cloudflare no Raspberry e configurado um tunnel que possibilita a geração de um link acessível externamente.

O Grafana está configurado para realizar leituras periódicas no banco de dados e

atualizar automaticamente os gráficos apresentados na interface web, garantindo que as informações exibidas reflitam os dados mais recentes coletados pelo sistema. Exemplo da interface do grafana na Figura 16.

Figura 16 – Interface do Grafana.



Fonte: Autor.

Na interface do Grafana exibida na Figura 16, são apresentados os valores mais recentes de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, além dos gráficos que mostram a variação desses gases ao longo do tempo. No canto superior direito, é possível ajustar o período desejado para a análise dos gráficos. Atualmente, o Grafana está sendo hospedado localmente no Raspberry Pi e acessado diretamente por ele. Além disso, para permitir o acesso remoto, utiliza-se o Cloudflare para gerar um túnel com um link externo hospedado pela Cloudflare, possibilitando que o site do Grafana, que está hospedado no localhost, seja acessado de fora do ambiente local graças ao túnel estabelecido.

### 3.8 MONTAGEM DE BANCADA DE TESTES E REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS COM FRUTAS

A bancada de testes, referente à montagem pneumática, foi montada conforme ilustrado na Figura 13. Para as conexões, foram utilizados engates rápidos para as mangueiras, garantindo praticidade e segurança. Especial atenção foi dada às conexões com o ambiente que contém as frutas e o adsorvedor de CO<sub>2</sub>, a fim de prevenir infiltrações de gases. Testes de estanqueamento foram realizados para eliminar alterações no valor do oxigênio.

Na Figura 13, destaca-se o analisador de gás, que integra o Raspberry Pi, os sensores, os relés e a bomba de ar responsável por auxiliar na circulação do ar pelo sistema. As conexões do sistema desempenham as seguintes funções:

In N<sub>2</sub>: corresponde à entrada de nitrogênio, controlada por uma eletroválvula, que é acionada apenas quando os níveis de oxigênio excedem o *setpoint* definido.

In Ads: representa a entrada do adsorvedor no sistema. O adsorvedor é ativado somente quando o nível de CO<sub>2</sub> ultrapassa o *setpoint* estabelecido.

Out Ads: refere-se à saída de ar do sistema em direção ao adsorvedor de CO<sub>2</sub>. Este processo conta com o auxílio de uma bomba de ar adicional para facilitar o transporte do ar de volta para o sistema.

Alívio: corresponde à conexão do sistema com a atmosfera e desempenha duas funções:

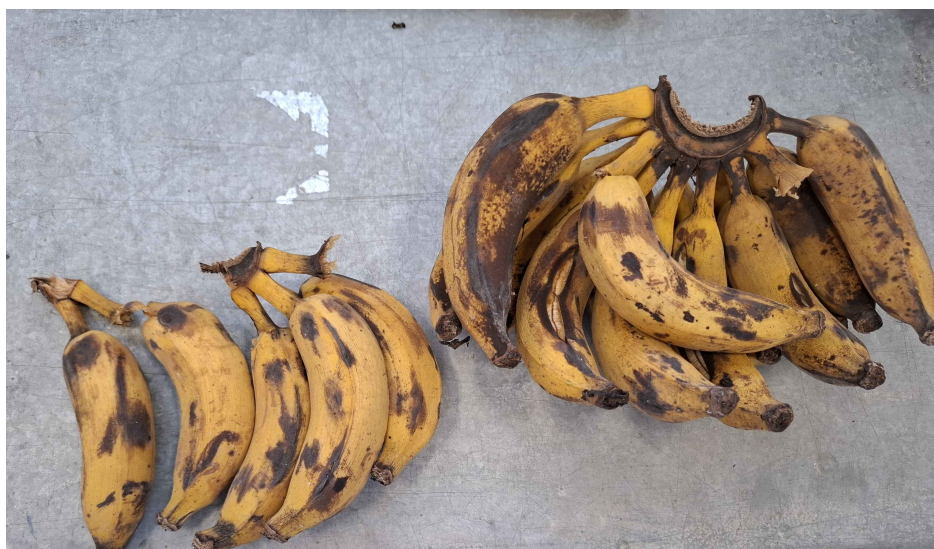
Função de alívio: quando o nitrogênio é introduzido no sistema, a pressão interna aumenta gradualmente. Caso essa pressão atinja níveis excessivos, há o risco de rompimento em alguma conexão. O mecanismo de alívio evita esse problema, liberando o excesso de pressão do sistema.

Função de entrada de oxigênio: atua para permitir a entrada de oxigênio no sistema quando os níveis de oxigênio estiverem abaixo do *setpoint* definido.

### 3.9 ANÁLISE DOS TESTES E RESULTADOS

Para a realização dos testes, aproximadamente 2 kg de bananas maduras, conforme apresetado na Figura 17, foram colocadas em um ambiente fechado da bancada de testes.

Figura 17 – Bananas utilizadas no teste.



Fonte: Autor.

O experimento iniciou-se à noite, por volta das 18 horas. De acordo com referências de estudos e trabalhos relacionados à área, esperava-se que as frutas respirassem oxigênio e liberassem dióxido de carbono. Assim, o resultado esperado na manhã seguinte seria a diminuição do nível de oxigênio dentro da câmara e o aumento do nível de dióxido de carbono. Importante destacar que, para este experimento, não foram realizadas intervenções externas no ambiente; os resultados foram exclusivamente influenciados pela ação respiratória das frutas. Considerando que o ar atmosférico possui cerca de 20,9% de  $O_2$  e 0,04% de  $CO_2$ , os valores obtidos na manhã seguinte estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Teste de respiração da fruta.



Fonte: Autor.

Conforme observado na Figura 18, o nível de  $O_2$  caiu para 16%, enquanto o  $CO_2$  subiu para aproximadamente 6%. Esses resultados confirmaram que as frutas estavam respirando dentro do ambiente, validando o correto funcionamento dos sensores. Além disso, não foram detectadas infiltrações significativas de gás, e o sistema de banco de dados registrou as leituras corretamente, refletindo-as na interface web, conforme ilustrado na Figura 18.

Com o sucesso na leitura dos sensores e na monitoração do ambiente, foi possível avançar para os testes com as eletroválvulas, que controlam os níveis de gases para manter os parâmetros no *setpoint* desejado.

Nessa fase, foram realizados diversos testes com a injeção de nitrogênio e o adsorvedor de  $CO_2$  para verificar sua eficiência na redução dos níveis de gases. Em seguida, foram testados diferentes tempos de ativação das válvulas, avaliando o tempo de abertura para ajustar os níveis de  $O_2$  e  $CO_2$  de forma automática, além de determinar o período necessário para a homogeneização do ar no ambiente. Para validar o sistema, foram definidos aleatoriamente os *setpoints* de 6% para o oxigênio e 1% para o dióxido de carbono. No caso do oxigênio, o sistema mantém a concentração do gás precisamente em 6%, que

é o *setpoint* definido. Caso a concentração caia abaixo desse valor, o sistema aumentará a concentração até atingir o *setpoint*. Se a concentração subir acima de 6%, o sistema reduzirá o nível até o *setpoint*. Já no caso do dióxido de carbono, o sistema apenas garante que a concentração do gás permaneça abaixo de 1%, sem se preocupar com variações dentro desse limite, desde que o valor esteja abaixo do *setpoint*. Isso ocorre porque a fruta, ao expirar dióxido de carbono, naturalmente eleva a porcentagem de CO<sub>2</sub> dentro da câmara. Desta forma não é necessário realizar nenhuma ação forçada para elevar o nível de dióxido de carbono dentro da câmara.

A Figura 19 apresenta os gráficos dos resultados da variação de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> obtidos durante 14 horas seguidas, demonstrando o comportamento dos gases durante o experimento, a eficiência do sistema em manter os valores dentro dos parâmetros definidos e a eficiência do sistema.

Figura 19 – Controle dos gases.



Fonte: Autor.

Nos gráficos da Figura 19, observa-se que a concentração de CO<sub>2</sub> ultrapassou 1%, mas o sistema rapidamente adsorveu o excesso, reduzindo-a para valores abaixo desse limite. Por outro lado, o nível de O<sub>2</sub> caiu para 6%, e o sistema conseguiu mantê-lo dentro da faixa de tolerância definida pela histerese, ou seja, a margem de variação aceitável para o oxigênio. Nesse caso, a histerese foi configurada em 0,2%, o que significa que o sistema deve manter o nível de O<sub>2</sub> entre 5,8% e 6,2%. Sempre que o oxigênio ultrapassar esse intervalo, seja para cima ou para baixo, o sistema tomará medidas corretivas para mantê-lo dentro da faixa estabelecida.

## 4 CONCLUSÃO

Este projeto representou um marco significativo no meu desenvolvimento na área de hardware. A experiência adquirida ao longo do processo, assim como a colaboração com os envolvidos, acrescentou valor inestimável ao meu portfólio de habilidades técnicas e práticas.

Concluiu-se que o sistema foi capaz de controlar os gases dentro da faixa desejada, demonstrando que as frutas respiram oxigênio e expiram gás carbônico. A eficiência do sistema, baseado em um controle ON-OFF otimizado, mostrou-se satisfatória ao manter os níveis de gases dentro de uma margem aceitável. No entanto, durante o desenvolvimento, surgiram desafios técnicos, como dificuldades com um dos sensores que não correspondia aos resultados esperados nem às especificações fornecidas pelo fabricante, exigindo ajustes na implementação e nos testes. Além disso, foi identificado um problema de infiltração de oxigênio, que afetava a precisão do controle. Esse problema levou tempo para ser detectado e corrigido, mas sua resolução foi fundamental para garantir o desempenho e a confiabilidade do sistema.

A interface web foi concluída com sucesso, permitindo o acesso remoto ao sistema fora do servidor local sem problemas. Além disso, a interface consegue atualizar automaticamente os dados, puxando-os frequentemente do banco de dados para garantir que as informações exibidas estejam sempre atualizadas.

Analisando as curvas do gráfico do controle de gases, conforme mostrado na Figura 19, foi possível confirmar que o sistema conseguiu controlar a concentração de  $\text{CO}_2$  abaixo do *setpoint* e manter o  $\text{O}_2$  dentro de uma margem aceitável em relação ao *setpoint*, comprovando a eficácia do controle realizado.

Para trabalhos futuros, diversas melhorias podem ser consideradas. A implementação de técnicas de inteligência artificial poderia otimizar o controle dos gases, ajustando automaticamente o tempo de ativação das válvulas e o período de homogeneização do ambiente. Além disso, para comprovar a eficácia no prolongamento da vida útil das frutas, seria necessário aplicar o sistema em uma câmara fria, onde a redução da temperatura diminuiria o metabolismo das frutas, reduzindo a necessidade de oxigênio e permitindo um controle mais eficiente dos gases.

Outra melhoria relevante seria o desenvolvimento de uma PCB (Placa de Circuito Impresso) dedicada para o hardware, o que reduziria problemas eletrônicos, otimizaria o espaço e aumentaria a confiabilidade do sistema. Essas futuras implementações podem elevar ainda mais a eficácia e a aplicabilidade do projeto, consolidando seu potencial em ambientes comerciais e industriais.

## REFERÊNCIAS

A. SIEBER, P. Enoksson; KROZER, A. Smart Electrochemical Oxygen Sensor for Personal Protective Equipment. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 6, p. 1846–1852, 2012. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2178593.

A. T. JOSEPH KURIEN, S. A. Mathew; MANA, S. C. Development of PHP and MySQL based Digital Asset Management System for Secure Organizations. **6th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)**, Tirunelveli, India, p. 1859–1863, mai. 2022. DOI: 10.1109/ICOEI53556.2022.9776698.

ADAFRUIT. **ADS1115 Analog-to-Digital Converter Data Sheet**. Acessado em: 2 dez. 2024. 2023. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/ads1115.pdf>.

AL., R. Carlos et. Web-based sensor streaming wearable for respiratory monitoring applications. **IEEE International Conference on Sensors (ICSSENS)**, Limerick, Ireland, p. 901–903, out. 2011. DOI: 10.1109/ICSSENS.2011.6127168.

AL., Y. Ma et. A Review of Electrochemical Electrodes and Readout Interface Designs for Biosensors. **IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society**, v. 3, p. 76–88, 2023. DOI: 10.1109/OJSSCS.2022.3221924.

ARDUINO. **Arduino - Open Source Platform**. Acessado em: 30 nov. 2024. 2024. Disponível em: <https://www.arduino.cc>.

BEAGLEBOARD. **BeagleBoard - Open Source Single-Board Computer**. Acessado em: 30 nov. 2024. 2024. Disponível em: <https://beagleboard.org>.

BRACKMANN, Auri. Uso da atmosfera controlada é recente no Brasil. **Visão Agrícola**, mar. 2017. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va07armazenamento03.pdf>.

BRACKMANN, Auri; WEBER, Anderson; OUTROS. Manutenção da qualidade pós-colheita de maçãs 'Royal Gala' e 'Galaxy' sob armazenamento em atmosfera controlada. **Ciência Rural**, Universidade Federal de Santa Maria, v. 38, n. 9, 2008.

FLORES. Producción, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) **Universidad Nacional de Colombia-Facultad de Agronomía, S.l.**, 2000.

FOUNDATION, Raspberry Pi. **Raspberry Pi Foundation - Official Website**. Acessado em: 30 nov. 2024. 2024. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/>.

HONEYWELL. **CityTech 5FO Gas Sensor Data Sheet**. Acessado em: 2 dez. 2024. 2023. Disponível em:

edam/sps/siot/ko-kr/products/sensors/gas-sensors/5-series/documents/sps-siot-citytech-5fo-sensor-datasheet.pdf.

INSTRUMENTS, Texas. **PCF8574 I/O Expander Data Sheet**. Acessado em: 2 dez. 2024. 2023. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574.pdf>.

JAIN, G. H. MOS gas sensors: What determines our choice? **Fifth International Conference on Sensing Technology**, Palmerston North, New Zealand, p. 66–72, nov. 2011. DOI: 10.1109/ICSensT.2011.6137067.

JAMIESON, P.; HERDTNER, J. More Missing the Boat—Arduino, Raspberry Pi, and Small Prototyping Boards and Engineering Education Needs Them. **IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)**, El Paso, TX, USA, p. 1–6, out. 2015. DOI: 10.1109/FIE.2015.7344259.

JOSHI, C. K.; JUGRAN, S. Design and Development of an Embedded Based Device for the Detection of Toxic Gases with Raspberry Pi. **International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM)**, Dehradun, India, p. 437–442, dez. 2020. DOI: 10.1109/ICACCM50413.2020.9213074.

LIDSTER, P. D. *et al.* Controlled-atmosphere Disorders of Commercial Fruits and Vegetables. **Communications Branch, Agriculture Canada**, S.l., 1990. Agriculture Canada. Publication 1847/E.

MIZSEI, János. Forty Years of Adventure with Semiconductor Gas Sensors. **Procedia Engineering**, v. 168, p. 221–226, 2016. Proceedings of the 30th anniversary Eurosensors Conference – Eurosensors 2016, 4-7. Sepember 2016, Budapest, Hungary. ISSN 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.167>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816334774>.

NVIDIA. **NVIDIA Jetson Nano - AI Development Platform**. Acessado em: 30 nov. 2024. 2024. Disponível em: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano>.

SENSEAIR. **PSP141 Sensor Data Sheet**. Acessado em: 30 nov. 2024. 2023. Disponível em: <https://rmtplusstoragesenseair.blob.core.windows.net/docs/publicerat/PSP141.pdf>.

SENSORTEC, Bosch. **BME280 Sensor Data Sheet**. Acessado em: 2 dez. 2024. 2023. Disponível em: <https://www.mouser.com/datasheet/2/783/BST-BME280-DS002-1509607.pdf?srsltid=AfmB0ooJY4fWwzZsxjyIFr1KxeMjir3dCjJi4hmHaA41UYxUy50icXaF>.

SO, Global. **HDW070<sub>08LZ02</sub>DisplayDataSheet**. Acessado em: 2 dez. 2024. 2024. Disponível em: [https://ecdn6.globalso.com/upload/p/1355/source/2024-11/HDW070\\_008LZ02\\_Datasheet1.pdf](https://ecdn6.globalso.com/upload/p/1355/source/2024-11/HDW070_008LZ02_Datasheet1.pdf).



SOLUTIONS, Gas Sensing. **SprintIR-6S Data Sheet Rev 4.12**. Acessado em: 30 nov. 2024. 2023. Disponível em: [https://www.gassensing.co.uk/wp-content/uploads/2023/05/SprintIR-6S-Data-Sheet-Rev-4.12\\_1.pdf](https://www.gassensing.co.uk/wp-content/uploads/2023/05/SprintIR-6S-Data-Sheet-Rev-4.12_1.pdf).

STEFFENS, C. A. *et al.* Taxa respiratória de frutas de clima temperado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 3, p. 293–298, 2007. DOI: 10.1590/S0100-204X2007000300003.

THEWES, F. R. *et al.* Dynamic controlled atmosphere: A review of methods for monitoring fruit responses to low oxygen. **Comunicata Scientiae**, v. 12, e3782, 2021.