INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

FILIPE KUHNEN

Sistema de monitoramento e controle de qualidade de ar interno (QAI)

São José - SC Fevereiro/2024

SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE QUALIDADE DE AR INTERNO (QAI)

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia de Telecomunicações do campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Engenheiro de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Carlos Boabaid Neto, Dr.

Coorientador: Prof. Marcelo Luiz Pereira, Dr.

São José - SC Fevereiro/2024

Filipe Kuhnen

Sistema de monitoramento e controle de qualidade de ar interno (QAI)/ Filipe Kuhnen. – São José - SC, Fevereiro/2024-

121 p. : il. digital.

Orientador: Prof. Carlos Boabaid Neto, Dr.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC Campus São José Engenharia de Telecomunicações, Fevereiro/2024.

1. Qualidade do ar. 2. Internet das coisas. 3. Sensoriamento remoto. 4. Ventilação controlada por demanda. I. Prof. Carlos Boabaid Neto, Dr.. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Campus São José. IV. Sistema de monitoramento e controle de qualidade de ar interno (QAI)

FILIPE KUHNEN

SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE QUALIDADE DE AR INTERNO (QAI)

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Telecomunicações, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

São José - SC, 15 de fevereiro de 2024:

Prof. Carlos Boabaid Neto, Dr. Orientador Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Marcelo Luiz Pereira, Dr. Coorientador Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Arliones Stevert Hoeller Junior, Dr. Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Nilton Francisco Oliveira da Silva, Dr. Instituto Federal de Santa Catarina

"Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente." (Roger Von Oech)

RESUMO

A má qualidade do ar em ambientes fechados é um problema que apresenta riscos à saúde dos indivíduos que convivem nestas condições. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma solução para o monitoramento da qualidade do ar e controle em tempo real da taxa de ventilação em ambientes fechados. Para tal, foram integrados microcontroladores, sensores e atuadores, com uma interface web e banco de dados para monitorar e acompanhar as medições. As informações obtidas são disponibilizadas em tempo real. O sistema agiu no controle da velocidade de um ventilador ou exaustor instalado no recinto, controlando desta forma a taxa de renovação do ar, com base na medição da concentração de dióxido de carbono (CO_2) . Durante o desenvolvimento, foram exploradas duas estratégias de ventilação controlada por demanda: a abordagem on/off e o controle proporcional puro. Os resultados indicaram que o controle proporcional puro se destacou como a solução mais eficaz para o problema em questão. O sistema desenvolvido foi testado em sala de aula do Campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), monitorando temperatura, umidade relativa do ar, concentração de CO_2 e contagem de material particulado, e disponibilizando estas informações em tempo real através de *interface web*. O sistema mostrou-se capaz de manter a concentração de CO_2 abaixo dos níveis permitidos pelas normas técnicas, quando respeitado o limite de capacidade do ventilador.

Palavras-chave: Qualidade do ar. Internet das coisas. Sensoriamento remoto. Ventilação controlada por demanda.

ABSTRACT

The poor air quality in enclosed spaces is a problem that poses risks to the health of individuals who inhabit such conditions. This work aimed to develop a solution for monitoring air quality and real-time control of ventilation rates in enclosed environments. To achieve this, microcontrollers, sensors, and actuators were integrated, along with a web interface and database for monitoring and tracking measurements. The information obtained is made available in real-time. The system acted to control the speed of a fan or exhaust fan installed in the space, thus regulating the air renewal rate based on the measurement of carbon dioxide CO_2 concentration. During development, two demandcontrolled ventilation strategies were explored: the on/off approach and pure proportional control. Results indicated that pure proportional control emerged as the most effective solution for the problem at hand. The developed system was tested in a classroom at the São José Campus of the Federal Institute of Santa Catarina IFSC, monitoring temperature, relative humidity, CO_2 concentration, and particulate matter count. It provided this information in real-time through a web interface. The system demonstrated its ability to maintain CO_2 concentration below levels permitted by technical standards when respecting the fan's capacity limit.

Keywords: Air quality. Internet of Things. Remote sensing. Demand-controlled ventilation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Internet das coisas como resultado de diferentes visões	22
Figura 2 –	Esquemático da comunicação serial	26
Figura 3 $-$	Esquemático da comunicação serial - assíncrona	26
Figura 4 –	Esquemático da comunicação serial - síncrona	27
Figura 5 –	Barramento Inter-Integrated Circuit (I2C)	28
Figura 6 –	Espectros de absorção de moléculas de gás na faixa de infravermelho	
	médio	29
Figura 7 –	Princípio operacional do sensor Non-Dispersive Infrared (NDIR)	29
Figura 8 –	Modulação por largura de pulso	31
Figura 9 –	Sensores SCD30(esquerda) e T6615-10K(direita)	34
Figura 10 –	Mapeamento dos pinos do SCD30	35
Figura 11 –	Sensores AHT10(esquerda) e DHT11(direita)	37
Figura 12 –	Sensor de material particulado	38
Figura 13 –	Mapeamento dos pinos do HPMA115cO-004	39
Figura 14 –	Triode for Alternating Current (TRIAC): Circuito equivalente	40
Figura 15 –	Módulo de controle de potência	40
Figura 16 –	Mapeamento dos pinos do DM02A	41
Figura 17 –	Exaustor AXC 250A - INDUSTRIAL.	42
Figura 18 –	Plataformas de internet das coisas	43
Figura 19 –	Mapeamento dos pinos do NodeMCU (ESP8266).	44
Figura 20 –	Diagrama de blocos do protótipo	46
Figura 21 –	Diagrama esquemático inicial do protótipo	46
Figura 22 –	Fluxograma função setup()	49
Figura 23 –	Fluxograma função loop()	51
Figura 24 –	Funcionamento protocolo MQTT	53
Figura 25 –	Conexões dos nós no node-red	54
Figura 26 –	Dashboard	55
Figura 27 –	Fluxo da informação no sistema	57
Figura 28 –	Montagem do protótipo	58
Figura 29 –	Diagrama esquemático final do protótipo	58
Figura 30 –	Concentração de CO_2 no cenário sem controle	61
Figura 31 –	Temperaturas no cenário sem controle	61
Figura 32 –	umidade relativa do ar (UR) no cenário sem controle $\ldots \ldots \ldots \ldots$	62
Figura 33 –	Níveis de materiais particulados no cenário sem controle	62
Figura 34 –	Cálculo da vazão de ar externo no cenário sem controle	63

Figura 35 – Concentração de CO_2 no cenário com controle on/off	64
Figura 36 – Temperaturas no cenário om controle on/off	64
Figura 37 – UR no cenário om controle on/off	65
Figura 38 – Níveis de materiais particulados no cenário om controle $\mathit{on/off}$	65
Figura 39 – Níveis do exaustor no cenário com controle on/off	66
Figura 40 – Cálculo da vazão de ar externo no cenário com controle $\mathit{on/off}$	66
Figura 41 – Concentração de CO_2 no cenário com controle proporcional	67
Figura 42 – Temperaturas no cenário com controle proporcional	68
Figura 43 – UR no cenário com controle proporcional	68
Figura 44 $-$ Níveis de materiais particulados no cenário com controle proporcional .	69
Figura 45 – Cálculo da vazão de ar externo no cenário com controle proporcional $% \mathcal{A}$.	69
Figura 46 – Leituras dos níveis do exaustor no cenário com controle proporcional $\ $.	70
Figura 47 – Comparativo das leituras da concentração de CO_2	71
Figura 48 – Comparativo das leituras de temperaturas	72
Figura 49 – Comparativo das leituras de UR	73
Figura 50 – Comparativo dos níveis de concentração de $\mathrm{PM}_{2,5}$	74
Figura 51 – Comparativo dos níveis de controle do exaustor $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	75
Figura 52 – Comparativo da vazão de ar externo calculada	76
Figura 53 – Comparativo do consumo de energia $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	77
Figura 54 – Leituras de concentração de CO_2	78
Figura 55 – Leituras das temperaturas $\ldots \ldots \ldots$	79
Figura 56 – Leituras das UR \ldots	79
Figura 57 – Leituras dos níveis de materiais particulados	80
Figura 58 – Leituras dos níveis do exaustor $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	80
Figura 59 – Cálculos da vazão de ar externo	81

LISTA DE QUADROS

20
24
34
34
35
36
36
37
38
39
41
41
42
44
45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre concentração de CO_2 e o nível do controlador 59

LISTA DE CÓDIGOS

Código 3.1 – Bibliotecas utilizadas no firmware $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	47
Código 3.2 – Função setup()	49
Código 3.3 – Função loop()	50
Código 3.4 – Função que aloca objetos em variáveis $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAVA Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquectinanto	i- 9
ADC Analog-to-Digital Converter 24	4
ANVISA Agência Nacional de Vigilância Sanitária	7
ASHRAE Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e A Condicionado	r 7
CO_2 dióxido de carbono	5
CPU Central Process Unit	3
DCV Demand Control Ventilation	0
GPIO General Purpose Input/Output	5
I/O input/output	4
I2C Inter-Integrated Circuit	7
IEEE Instituto de Engenheiros Eletrônicos e Eletricistas	3
IFSC Instituto Federal de Santa Catarina	5
InfluxQL Influx Query Language	6
IoT Internet of Things	0
JSON JavaScript Object Notation	8
Mbps megabits por segundo 23	3
MIMO Multiple Input Multiple Output	4
MQTT Message Queuing Telemetry Transport	5
NDIR Non-Dispersive Infrared	7
PM Particulate Matter $\dots \dots \dots$	7
\mathbf{ppm} partes por milhão	7
PWM Pulse Width Modulation	4
\mathbf{QAI} qualidade do ar interno \ldots	9
QoS Controle de qualidade de serviço	2
RX Recepção	7
SCL Serial Clock Line	7
SDA Serial Data	7
SISO Single Input Single Output	3
SM Sistema de medição $\ldots \ldots \ldots$	2
SPI Serial Peripheral Interface	5

TRIAC Triode for Alternating Current	7
TSDB Banco de dados de séries temporais	56
\mathbf{TX} Transmissão	27
UART Universal Asynchronous Receiver and Transmitter	25
UART Universal Asynchronous Receiver and Transmitter	25
\mathbf{UR} umidade relativa do ar	7
WLAN Rede de área local sem fio \ldots	23

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1		17
1.1		17
1.2	Objetivos específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO ΤΕÓRICA	19
2.1	Qualidade do ar interno (QAI)	19
2.2	Ventilação controlada por demanda baseada em CO_2	20
2.3	Internet das coisas (IoT)	21
2.4	Sistemas embarcados	21
2.4.1	Microcontroladores	23
2.4.2	Wifi	23
2.4.3	Interfaces de entrada e saída	24
2.4.4		25
2.4.4.1	Transmissão assíncrona	26
2.4.4.2	Transmissão síncrona	27
2.4.5	Sensores	28
2.4.5.1	Medição não dispersiva de infravermelho	28
2.4.6	Atuadores	30
2.4.6.1	Saída <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM)	30
3	METODOLOGIA	20
J 2 1		22
J.I		JZ
3.1.1		33
3.1.1.1	Sensor de dioxido de carbono (CO_2)	33
3.1.1.2	Sensor de temperatura e umidade relativa do ar (UR)	35
3.1.1.3		37
3.1.2	Definição dos atuadores	38
3.1.2.1	Módulo de controle de potência	39
3.1.2.2	Exaustor	42
3.1.3	Definição do microcontrolador	43
3.2	Montagem do protótipo inicial	46
3.3	Desenvolvimento do firmware	47
3.3.1	Bibliotecas	47
3.3.2	Estrutura do <i>firmware</i>	48

3.3.2.2	Função loop()	50
3.4	Metodologia de obtenção de dados	52
3.4.1	Protocolo de comunicação: Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)	52
3.5	Metodologia de disponibilização e armazenamento de dados	53
3.5.1	Interface gráfica: Node-red	53
3.5.2	Banco de dados: InfluxDB	56
3.6	Fluxo da informação no sistema	56
3.7	Controle de velocidade do ventilador monofásico	57
4	RESULTADOS	60
4.1	Ensaios de validação	60
4.1.1	Ensaio 1: sem controle	60
4.1.2	Ensaio 2: controle <i>on/off</i>	63
4.1.3	Ensaio 3: controle proporcional	67
4.2	Comparativo dos resultados	71
4.2.1	Leituras da concentração de CO_2	71
4.2.2	Leituras de temperaturas	72
4.2.3	Leituras de umidade relativa do ar (UR)	73
4.2.4	Concentração de $PM_{2.5}$	73
4.2.5	Níveis de controle do exaustor	74
4.2.6	Cálculos da vazão de ar externo	75
4.2.7	Consumo de energia	76
4.3	Teste em sala de aula ocupada	77
5	CONCLUSÕES	82
5.1	Trabalhos futuros	83
•		
	REFERÊNCIAS	84
		•••
	APÊNDICES	91
	APÊNDICE A – ENSAIOS PARA O CONTROLE DE VELOCI-	
	DADE DO VENTILADOR MONOFÁSICO	92
	APÊNDICE B – DETALHAMENTO DO TRABALHO EXPERIMEN-	
	TAL	98
	APÊNDICE C – CÁLCULO DA VAZÃO DE AR EXTERNO 1	105
	APÊNDICE D – CALIBRAÇÃO DO SENSOR PZEM-004T 1	108

APÊNDICE	E – CÁLCULO DA GERAÇÃO DE CO ₂ NO AMBIENTE113
APÊNDICE	F – INCERTEZAS DE MEDIÇÃO116
APÊNDICE	G – ORÇAMENTO DO PROJETO

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ar é fundamental para a saúde e bem-estar humano. Respirar ar puro é essencial para a vida e a má qualidade do ar pode causar graves problemas de saúde, como doenças respiratórias e cardiovasculares.

Em ambientes com grande ocupação, como escritórios e outros locais fechados, a implementação de estratégias eficientes de ventilação pode reduzir significativamente o risco de transmissão de doenças (LIPINSKI et al., 2020). Estudos também destacam uma correlação entre níveis elevados de dióxido de carbono (CO_2) em ambientes fechados e impactos adversos à saúde e ao desempenho no trabalho (WILLIAM; WARGOCKI; ZHANG, 2019).

A concentração de dióxido de carbono pode ser utilizada como um indicador da qualidade do ar interno, pois a maior parte desse gás é gerada pelo metabolismo humano e sua alta concentração indica uma baixa renovação de ar naquele ambiente (SILVA; REGUEIRO; DINIS, 2007).

A Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (ASHRAE) publicou a norma 62.1 (ASHRAE, 2019), definindo a qualidade do ar interno aceitável como "ar no qual não há contaminantes conhecidos em concentrações nocivas, conforme determinado por autoridades competentes, e com o qual uma maioria substancial (80% ou mais) das pessoas expostas não expressa insatisfação".

A monitoração e o controle da qualidade do ar são importantes para garantir ar seguro e saudável. No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), por meio da Resolução n^o 9 de janeiro de 2003 (ANVISA, 2003), estabeleceu parâmetros como referência para a qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente. Essa resolução preconiza que a concentração de CO_2 deve apresentar o valor máximo de 1000 partes por milhão (ppm), enquanto a temperatura e a umidade relativa do ar devem manter-se entre 23 °C e 26°C e entre 40% e 65%, respectivamente.

O controle da qualidade do ar em ambientes fechados envolve a implementação de medidas destinadas a diminuir a concentração de poluentes, como demonstrado neste estudo, por meio de um sistema de renovação de ar.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma solução de monitoramento e controle em tempo real da vazão de ar externo e da qualidade do ar em ambientes fechados, conforme as diretrizes estabelecidas pela ANVISA.

1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- 1. desenvolver um sistema de aquisição capaz de coletar, em ambientes fechados, dados como concentração de particulados e de CO_2 , temperatura e umidade do ar;
- 2. projetar um controlador capaz de operar autonomamente o sistema de ventilação, ativando o exaustor quando necessário;
- 3. realizar testes em laboratório com o intuito de aferir e validar os dados experimentais coletados pelo sistema desenvolvido e a atuação do controlador;
- 4. implantar e testar o sistema em uma sala de aula ocupada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo revisar as bases teóricas que fundamentam a pesquisa desenvolvida neste trabalho de conclusão de curso. Ao longo das próximas seções, serão explorados os conceitos fundamentais, os componentes essenciais e as ferramentas empregadas no desenvolvimento do sistema de monitoramento e controle de qualidade do ar interno.

Foi realizada uma análise de cada elemento escolhido para a construção do protótipo, apresentadas as justificativas e motivações por trás da seleção de cada componente. O intuito é proporcionar uma compreensão clara do embasamento teórico que norteia a materialização prática do projeto, além de oferecer uma visão detalhada das escolhas efetuadas e das razões que as fundamentam.

2.1 Qualidade do ar interno (QAI)

A QAI surgiu como ciência a partir dos anos posteriores a 1970, com a crise energética e a consequente construção dos edifícios selados (desprovidos de ventilação natural), e se destacou após a descoberta de que a diminuição das taxas de troca de ar nesses ambientes era a grande responsável pelo aumento da concentração de poluentes no ar interno (SCHIRMER et al., 2011).

A medição da concentração de CO_2 , gás resultante do metabolismo humano, na ausência de outras fontes (por exemplo, a combustão) pode ser utilizada como uma forma de avaliar o grau de contaminação do ar interior por origem antrópica (SOBREIRA, 2015). Logo, a concentração deste gás pode ser usada para avaliar a vazão de ar externo em ambientes internos. Em locais onde a concentração de CO_2 é elevada, em relação ao ambiente externo, pode-se dizer que este é mal ventilado.

A resolução RE nº 9, (ANVISA, 2003) recomenda determinados padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. No Quadro 1, pode-se notar que, dentre outros parâmetros, o dióxido de carbono tem seu valor máximo de concentração definido em 1000 ppm e é definido como indicador de renovação de ar externo, recomendado para conforto e bem-estar.

A Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA) destaca em sua cartilha (ABRAVA, 2021), que ambientes com níveis de concentração de dióxido de carbono (CO_2) superiores aos limites estabelecidos podem resultar em uma redução na produtividade das pessoas, decorrente de sonolência involuntária e perda de capacidades cognitivas. Segundo a ABRAVA (2021), o desempenho

Valores máximos recomendáveis					
Concentração de CO_2	$1000 \mathrm{\ ppm}$				
Aerodispersóides totais no ar	$80~\mu g/m^3$				
Temperatura (verão)	de 23°C a 26°C				
Temperatura (inverno)	de 20°C a 22°C				
Umidade relativa do ar (verão)	40%a $65%$				
Umidade relativa do ar (inverno)	35%a $65%$				
Renovação do ar (ambiente normal) - taxa	27 m^3 /hora/pessoa.				
Renovação do ar (ambiente alta rotatividade) - taxa	$17 \text{ m}^3/\text{hora/pessoa}$				
Fonte: adaptado de ANVISA (2003).					

Quadro 1 – Padrões referenciais de QAI

individual pode ser comprometido, levando à diminuição na capacidade de raciocínio e compreensão.

Assim, o monitoramento e o controle da qualidade do ar interno emergem como aspectos cruciais para assegurar um ambiente propício à saúde e eficiência.

2.2 Ventilação controlada por demanda baseada em CO_2

A ventilação controlada por demanda, *Demand Control Ventilation* (DCV) do inglês, é uma estratégia que busca maximizar a eficiência energética de sistemas de ventilação em edifícios, ajustando a vazão de ar externo de acordo com a demanda de ocupação do espaço. No contexto de *Internet of Things* (IoT), essa técnica pode ser ainda mais eficaz, permitindo a coleta de dados precisos e em tempo real sobre a qualidade do ar interno, como a concentração de dióxido de carbono.

Quando baseada nos níveis de CO_2 , essa estratégia consiste na união de dois elementos tecnológicos: sensores de CO_2 e um sistema atuador. Os sensores monitoram continuamente o ar em um ambiente e enviam informações para os controladores de ventilação (atuadores), que regulam automaticamente a ventilação quando as concentrações de dióxido de carbono ultrapassam um certo nível, possibilitando a renovação do ar (METELSKIY, 2011). Para aprimorar ainda mais esse processo, pode-se incorporar aplicações IoT, permitindo a integração com outros sistemas, como o monitoramento remoto e o armazenamento do histórico de dados.

Esse método apresenta várias vantagens em relação à ventilação convencional com vazão fixa, independentemente da ocupação. Isso ocorre porque a DCV é capaz de ajustar as vazões de ar de acordo com a ocupação real do espaço, proporcionando melhor eficiência energética, através da redução do consumo de energia. Além disso, essa técnica pode melhorar a qualidade do ar interno e criar um ambiente mais confortável e saudável para os ocupantes (ARCHITECTURAL ENERGY CORPORATION, 2007).

2.3 Internet das coisas (IoT)

Provavelmente, a *internet* foi o maior sistema já criado pelo homem, com milhões de computadores conectados por intermédio de seus enlaces de comunicação. Bilhões de usuários se interligam através de seus *laptops*, *tablets* e com uma série de outros dispositivos, como sensores, *webcams*, consoles para jogos, quadros de imagens e, até mesmo, máquinas de lavar (KUROSE; ROSS, 2013).

Nos últimos 20 anos, o cenário da comunicação sofreu transformações significativas, devido à popularização da *internet*. Nesta perspectiva, a disseminação do seu uso pode ser considerada um dos principais motivos do surgimento do termo *internet* das coisas, que é uma tradução de *Internet of Things* (IoT) (SATO, 2015).

A *internet* das coisas pode ser definida como o conjunto de dispositivos conectados à internet que coletam e compartilham dados. Inclui sensores, atuadores, dispositivos móveis e computadores pessoais, permitindo a comunicação entre os dispositivos e a análise de dados para geração de *insights* valiosos (GOKHALE; BHAT; BHAT, 2018). A IoT se concentra na conexão dos objetos à *internet* e na coleta de informações sobre seu estado e funcionamento, permitindo que esses objetos atuem de forma autônoma e produzam dados em grande escala (LACERDA; LIMA-MARQUES, 2015). Assim sendo, a interligação destes dispositivos com a *internet*, a fim de produzir e coletar informações, além de realizar ações de forma independente com base nos dados colhidos, os tornou inteligentes (SÔNEGO; MARCELINO; GRUBER, 2016).

Atzori, Iera e Morabito (2010) mapearam os trabalhos na área de *internet* das coisas, concebendo três visões orientadas: às coisas, à *internet* e à semântica, formando o paradigma da IoT ilustrado na Figura 1. Os trabalhos focados nas "coisas" buscam maximizar o uso dos recursos dos dispositivos e sua capacidade de comunicação.

A visão orientada à *internet* se concentra em adaptar os protocolos para permitir a transferência de dados entre os dispositivos IoT e a *internet*. A visão da semântica destaca a necessidade de lidar com a enorme quantidade de dados gerados pela IoT, justificando a criação de modelos para coletar, processar e utilizar esses dados e desenvolver ambientes semânticos. Tais trabalhos apresentam propostas que estão focadas na representação, armazenamento, interconexão, pesquisa e organização da informação gerada pela IoT, buscando soluções para a modelagem das descrições que permitam um tratamento adequado para os dados concebidos pelos objetos (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

2.4 Sistemas embarcados

Um sistema embarcado é um tipo de sistema eletrônico dedicado a executar uma tarefa específica, interagindo continuamente com o ambiente por meio de sensores e



Figura 1 – Internet das coisas como resultado de diferentes visões

Fonte: adaptado de Atzori, Iera e Morabito (2010).

atuadores (BALL, 2002). Esses sistemas são amplamente utilizados em diversas áreas, tais como: automação industrial, controle de processos, dispositivos médicos, automação residencial, entre outros.

Para projetar e desenvolver sistemas embarcados eficientes, é necessário ter conhecimentos sólidos em diversas áreas, a exemplo da programação, do controle de processos, das tecnologias de aquisição de dados (conversão analógico/digital e sensores) e de atuadores (conversão digital/analógico e PWM). Tais sistemas também podem envolver o uso de redes de comunicação, como *bluetooth*, *wifi*, *ethernet*, entre outros.

Os sistemas embarcados são categorizados como sistemas reativos, pois a aplicação executada depende diretamente do ambiente em que estão inseridos (BALL, 2002). Por essa razão, são projetados para operar em tempo real, ou seja, as ações devem ser executadas de forma rápida e confiável para garantir o funcionamento correto do sistema.

O núcleo dos sistemas embarcados é o microcontrolador, que é responsável por receber e processar os dados de entrada, executar a lógica do sistema e gerar as ações correspondentes na saída (STALLINGS, 2017). O microcontrolador é como uma caixa preta, em que as entradas são processadas internamente e, em seguida, produzem ações específicas na saída.

2.4.1 Microcontroladores

Os microcontroladores são dispositivos eletrônicos altamente integrados que possuem uma Unidade de Processamento Central (do inglês, *Central Process Unit* (CPU)) e executam um conjunto de instruções operacionais. Além disso, eles também incluem todos os periféricos necessários para executar uma aplicação específica, como contadores, memórias, barramentos, temporizadores, interfaces de comunicação (serial, *ethernet*, *bluetooth* e *wifi*) e conversores analógico-digital, entre outros recursos comuns (OLIVEIRA; ANDRADE, 2010; OLIVEIRA, 2021).

Esses circuitos integrados são amplamente utilizados em uma variedade de sistemas embarcados, dentre os quais pode-se citar os dispositivos médicos e automóveis, devido a sua capacidade de incorporar funções completas em um único instrumento. O uso de microcontroladores possibilita a criação de sistemas mais eficientes e econômicos, ao mesmo tempo em que oferece maior controle e precisão sobre o funcionamento do sistema.

2.4.2 Wifi

A tecnologia *wifi* é uma forma conveniente e eficiente de conectar dispositivos à *internet* sem a necessidade de cabos. Ela utiliza ondas de rádio para transmitir dados de forma segura e confiável, conforme descrito por Baños-Gonzalez et al. (2016). O Instituto de Engenheiros Eletrônicos e Eletricistas (IEEE) desenvolveu diversos padrões para Rede de área local sem fio (WLAN), incluindo o IEEE 802.11 (IEEE, 2021), conhecido como *wifi*. Desde o lançamento do primeiro padrão, em 1997, houve várias atualizações, acrescentando o IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g e 802.11n (VENTURI FILHO, 2016). Além disso, foram adicionadas outras extensões para melhorar a velocidade, qualidade de serviço e segurança, como IEEE 802.11s, 802.11u, 802.11w, 802.11ad e 802.11ac, que prometem uma taxa de transferência elevadas para WLAN (BANERJI; CHOWDHURY, 2013).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo explorar os padrões IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g e 802.11n, amplamente utilizados para prover conectividade sem fio em ambientes domésticos e de escritório, com operação em 2,4 GHz e 5 GHz. Tais padrões possuem características técnicas distintas, cujo propósito é melhorar a qualidade de transmissão, cobertura e eficiência de energia, conforme ilustrado no Quadro 2.

O IEEE 802.11a foi um dos primeiros a ser desenvolvido e opera na faixa de frequência de 5 GHz. Embora essa faixa torne-o menos propenso a interferências, sua cobertura é limitada e pode ter dificuldade para atravessar paredes ou obstáculos (VENTURI FILHO, 2016). Além disso, é importante mencionar que esse padrão utiliza a modulação Single Input Single Output (SISO), ou seja, apenas uma antena para envio e recepção de dados. A velocidade máxima teórica do IEEE 802.11a é de 54 megabits por segundo (Mbps).

Por outro lado, o IEEE 802.11b é um dos padrões mais antigos e opera na faixa de

Geração	1G	$2\mathrm{G}$	3	G	4G
IEEE WLAN	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n
Lançamento	1997	1999	1999	2003	2009
Taxa de dados (teórica)	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	600 Mbps
Faixa de frequência	$2,4~\mathrm{GHz}$	$2,4~\mathrm{GHz}$	$5~\mathrm{GHz}$	$2,4~\mathrm{GHz}$	2,4/5GHz
Largura de banda do canal	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz, 40 MHz
Arquitetura	SISO	SISO	SISO	SISO	MIMO

Quadro 2 – Quadro comparativo de diferentes padrões 802.11

Fonte: Adaptado de Vikulov e Paramonov (2020).

frequência de 2,4 GHz. Embora essa frequência o torne mais propenso a interferências de outros dispositivos, sua cobertura é melhor do que a do IEEE 802.11a e pode atravessar paredes e obstáculos com mais facilidade (VENTURI FILHO, 2016). Esse padrão também utiliza a modulação SISO e possui uma velocidade máxima teórica de 11 Mbps.

O IEEE 802.11g, que também utiliza a modulação SISO, é uma evolução do IEEE 802.11b e também opera na faixa de frequência de 2,4 GHz. Sua cobertura é semelhante à do IEEE 802.11b, mas sua velocidade máxima teórica é de 54 Mbps, tornando-o mais rápido.

O IEEE 802.11n é um padrão mais recente, que opera em ambas as faixas de frequência, de 2,4 GHz e 5 GHz. Esse padrão usa várias técnicas para melhorar a cobertura e aumentar a velocidade em comparação com os padrões anteriores. Como exemplo, pode-se mencionar que ele usa a modulação Multiple Input Multiple Output (MIMO), que permite a utilização de múltiplas antenas para enviar e receber dados simultaneamente, aumentando a taxa de transferência (que possui uma velocidade máxima teórica de 600 Mbps) e melhorando a cobertura.

Em resumo, os padrões IEEE 802.11 são essenciais para a comunicação sem fio e suas diversas ramificações permitem que as WLAN se adaptem a diferentes necessidades e requisitos técnicos. A tecnologia *wifi* é amplamente utilizada e permite a conexão com a internet por meio dessa tecnologia.

2.4.3 Interfaces de entrada e saída

As interfaces de entradas e saídas, *input/output* (I/O), são fundamentais para interagir com dispositivos periféricos, permitindo a comunicação entre o microcontrolador e dispositivos como sensores, *displays*, teclados, motores, entre outros (OLIVEIRA, 2021). Entre as interfaces de entrada e saída mais comuns em sistemas eletrônicos, estão o conversor analógico-digital, *Analog-to-Digital Converter* (ADC), e as entradas/saídas de propósito geral, General Purpose Input/Output (GPIO).

O ADC é uma interface que permite a conversão de sinais analógicos em digitais, o que é útil em muitos sistemas eletrônicos, especialmente aqueles que envolvem sensores ou sinais de entrada analógicos. A maioria dos modelos dos Arduino e o ESP8266 usam um ADC de 10 *bits*. Isso significa que a entrada analógica pode representar uma leitura entre 0 e 1023 (2^{10}), com uma resolução de aproximadamente 0,0049 V por unidade (ARDUINO.CC, 2022; ESPRESSIF, 2022b). Já no ESP32, são 12 *bits* de precisão do ADC, o que significa que a entrada analógica pode representar uma leitura entre 0 e 4095 (2^{12}), com uma resolução de aproximadamente 0,0008 V por unidade (ALBUQUERQUE, 2020).

O GPIO, por sua vez, é uma interface que permite a comunicação digital entre o sistema e dispositivos externos, como *leds*, motores, sensores, entre outros. Os pinos GPIO podem ser configurados como entradas ou saídas, permitindo que o sistema leia sinais de entrada ou envie sinais de saída para dispositivos externos, permitindo a leitura ou escrita de valores em um nível de sinal lógico, com precisão de um bit (0 ou 1). As portas GPIO podem ser configuradas para operar em diferentes modos, incluindo entrada, saída e diversas opções de comunicação serial. Além disso, como pode ser verificado nos *datasheet*, ambos os microcontroladores possuem suporte para interrupções em GPIO, que permitem que a unidade de processamento seja notificada imediatamente quando ocorre uma mudança no nível de sinal em uma porta GPIO específica (OLIVEIRA, 2021).

Em resumo, essas interfaces são cruciais para que o sistema possa se comunicar com o mundo ao seu redor, tornando possível a realização de diversas funções importantes, como medir a temperatura, detectar a presença de um objeto, controlar a velocidade de um motor ou exibir informações em um *display LCD*.

2.4.4 Comunicação serial

A transmissão serial é um método de comunicação de dados em que as informações são enviadas em série, um *bit* após o outro, como se extrai da Figura 2. Esse método é amplamente utilizado em sistemas eletrônicos por ser mais econômico do que a transmissão paralela, que requer n canais de comunicação entre os dispositivos. Embora a comunicação dentro dos dispositivos seja paralela, são necessários dispositivos de conversão para a interface entre o emissor e a linha (paralela-para-serial), e entre a linha e o receptor (serial-para-paralelo) (FOROUZAN, 2007).

A comunicação serial envolve diversos protocolos, como Serial Peripheral Interface (SPI), Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (UART) e Inter-Integrated Circuit (I2C), que estabelecem a maneira pela qual os dados são transmitidos. Esses métodos são amplamente utilizados em várias aplicações eletrônicas, graças à sua simplicidade,



Figura 2 – Esquemático da comunicação serial

Fonte: Forouzan (2007).

flexibilidade e baixo custo de implementação. Ao compreender esses procedimentos, é possível entender como os dispositivos eletrônicos se comunicam em série e como essa tecnologia é aplicada em sistemas de automação, transferência de dados e muitas outras áreas.

Existem três maneiras de realizar a transmissão serial de dados: assíncrona, síncrona e isócrona. Neste trabalho, serão abordados os métodos assíncrono e síncrono.

2.4.4.1 Transmissão assíncrona

Segundo Forouzan (2007), a transmissão serial assíncrona é uma técnica utilizada para transmitir blocos de informações entre dispositivos eletrônicos sem a necessidade de um *clock* para sincronização. Em vez disso, essa técnica se baseia em sinais de início e parada para indicar o início e o fim de cada bloco de informação enviado, conforme demonstrado na Figura 3. O *bit* de início, também chamado de sinal de início, é geralmente um *bit* com valor lógico 0, enquanto o sinal de parada é normalmente um ou mais *bits* com valor lógico 1, que pode variar de acordo com o protocolo de comunicação utilizado.



Figura 3 – Esquemático da comunicação serial - assíncrona



Fonte: Forouzan (2007).

Para estabelecer a comunicação serial assíncrona, são empregados protocolos de comunicação que definem como os blocos de informações devem ser enviados e recebidos. No âmbito de IoT, um protocolo comum é o UART que usa linhas separadas para Transmissão (TX) e Recepção (RX) de dados. Se um dispositivo é apenas transmissor, pode haver somente uma linha TX disponível (OLIVEIRA, 2021).

A técnica de comunicação serial assíncrona é amplamente utilizada em diversas aplicações por sua simplicidade e economia na transmissão de dados em bloco, contudo, é importante considerar que ela pode apresentar limitações, tais como baixa velocidade de transmissão e possibilidade de erros durante a transmissão.

2.4.4.2 Transmissão síncrona

A transmissão serial síncrona é um método de comunicação de dados que envia *bits* sequencialmente em *frame* através de um único canal de comunicação. Cada *frame* pode conter vários *bytes* e é sincronizado através de um *clock* compartilhado entre o transmissor e o receptor. Essa técnica permite uma taxa de transmissão constante e uma sequência contínua de 1 e 0, tornando-a uma das tecnologias mais eficientes para conectar dispositivos eletrônicos (FOROUZAN, 2007). A Figura 4 apresenta uma ilustração desse método de transmissão.





Fonte: Forouzan (2007).

Oliveira (2021) descreve um exemplo de protocolo de comunicação serial síncrono amplamente utilizado, o I2C. Esse protocolo utiliza apenas duas linhas: uma linha de dados, *Serial Data* (SDA), para transmitir informações e uma linha de *clock*, *Serial Clock Line* (SCL), para sincronizar a transmissão de dados entre os dispositivos conectados, como podemos observar na Figura 5. O esquema de endereçamento do I2C é uma característica importante, pois permite conectar vários dispositivos em uma única linha de dados e *clock*. Cada dispositivo tem um endereço único de 7 *bits*, permitindo um número máximo de 128 dispositivos (2^7), que evita conflitos de transmissão e permite a comunicação entre dispositivos mestre e escravo. No I2C, o dispositivo mestre controla a comunicação e inicia as transmissões de dados, enquanto os dispositivos escravos recebem as informações enviadas pelo mestre.



Fonte: Microchip (2018).

Em resumo, a transmissão serial síncrona e o protocolo I2C são importantes tecnologias de comunicação de dados entre dispositivos eletrônicos. Comparado à transmissão assíncrona, a transmissão serial síncrona geralmente oferece maior eficiência e velocidade, já que não há a necessidade de inserir *bits* de parada e início a cada *byte* transmitido. Por sua vez, o protocolo I2C utiliza um esquema de endereçamento que permite a conexão de múltiplos dispositivos em uma única linha de dados e *clock*, evitando conflitos de transmissão e possibilitando a comunicação entre dispositivos mestre e escravo.

2.4.5 Sensores

Conforme Bolton (2002) descreve, um transdutor é um dispositivo que tem a capacidade de converter uma grandeza física em outra que possa ser facilmente mensurada, por exemplo, ao transformar uma grandeza mecânica, como a pressão ou a deformação, em um sinal elétrico. Os sensores são um tipo específico de transdutor que convertem uma grandeza física em um sinal elétrico ou em outra forma que possa ser facilmente processada e interpretada.

Em sistemas microcontrolados, é fundamental que o transdutor ou sensor gere sinais elétricos que sejam compatíveis com os níveis de entrada utilizados, de modo a garantir a precisão e a confiabilidade das medições. A escolha dos transdutores ou sensores adequados para um projeto é um processo crítico, que requer consideração cuidadosa de vários fatores, tais como a faixa de medição, a resolução, a precisão, a linearidade e a estabilidade do dispositivo. Além disso, é importante levar em conta as condições ambientais em que o transdutor ou sensor será utilizado, como a temperatura, a umidade e a vibração, que podem afetar o seu desempenho.

2.4.5.1 Medição não dispersiva de infravermelho

A técnica de medição não dispersiva de infravermelho, NDIR é uma técnica óptica utilizada para detectar gases específicos em amostras gasosas e determinar suas concentra-

ções. Essa técnica é baseada na interação entre a radiação infravermelha e as moléculas dos gases em questão. O princípio da técnica NDIR consiste na passagem de um feixe de luz infravermelha através da amostra gasosa e na medição da quantidade de radiação absorvida pelos gases específicos de interesse. A absorção de radiação infravermelha ocorre em comprimentos de onda únicos e distintos para cada tipo de gás (conforme a Figura 6), o que possibilita a determinação da concentração do gás, por meio da quantidade de radiação absorvida em comprimentos de onda específicos (RK JHA, 2022).





Fonte: adaptado de RK JHA (2022).



Figura 7 – Princípio operacional do sensor NDIR

Fonte: adaptado de Edinburg Sensors (2022).

O sensor que utiliza a técnica não dispersiva de infravermelho é composto basicamente por uma fonte de luz infravermelha, um detector de luz e uma câmara de amostra. Na Figura 7, é possível observar que a fonte de luz infravermelha emite um feixe que é direcionado para a câmara de amostra, onde se encontra o gás a ser medido. O detector de luz fica localizado do outro lado da câmara de amostra e mede a quantidade de luz que atravessa a amostra de gás. Durante esse processo, algumas moléculas de gás absorvem a luz em comprimentos de onda específicos. A quantidade de luz absorvida é diretamente proporcional à concentração do gás na amostra. O detector de luz mede a quantidade de luz que passa através da amostra de gás, e essa informação é utilizada pelo microprocessador para calcular a concentração do gás, gerando um sinal elétrico proporcional à sua quantidade na amostra.

A técnica NDIR é amplamente utilizada em uma variedade de aplicações, incluindo análise ambiental, controle de emissões em processos industriais, monitoramento de qualidade do ar, detecção de vazamentos de gás, entre outras. É considerada uma técnica confiável, precisa e de baixo custo para a análise de gases em amostras gasosas.

2.4.6 Atuadores

Os elementos finais de controle, também conhecidos como atuadores, são dispositivos de saída que agem em resposta a comando recebido do microcontrolador (variação elétrica).

Os atuadores são dispositivos utilizados para controlar ou executar ações de acordo com uma programação pré-estabelecida. Eles são capazes de acionar diversos tipos de equipamentos elétricos, hidráulicos ou pneumáticos, como motores, lâmpadas e resistências. Para o seu funcionamento adequado, é necessário o uso de válvulas específicas para cada tipo de dispositivo (OLIVEIRA, 2021).

2.4.6.1 Saída Pulse Width Modulation (PWM)

Oliveira (2021) define a modulação por largura de pulso (PWM) como uma técnica utilizada na eletrônica para controlar a potência de dispositivos analógicos conectados à saída (GPIO) de sistemas microcontrolados. Essa técnica ajusta o ciclo de trabalho de um sinal pulsado para controlar a quantidade de energia fornecida ao dispositivo. O sinal PWM é composto por pulsos elétricos de duração fixa, com variação na largura do pulso.

Os microcontroladores são amplamente empregados na geração de sinais PWM, produzindo um sinal quadrado com uma frequência fixa e ajustando a largura do pulso em cada ciclo conforme o valor de controle desejado. Isso permite variar a velocidade do motor elétrico, por exemplo, modificando a largura do pulso.

A largura do pulso no sinal PWM é medida em porcentagem relacionada ao tempo em que o sinal está em nível alto em comparação ao ciclo completo. Por exemplo, um sinal PWM com ciclo de trabalho de 50% tem um pulso de largura igual à metade do ciclo completo, conforme visto na Figura 8. O uso de amplificadores em sua saída pode controlar



equipamentos, como pequenos motores, enquanto transistores de potência, triacs ou relés de estado sólido são usados para controlar cargas maiores, como chuveiros e aquecedores,

sendo chaveados em alta frequência, como no caso do PWM.

No ESP8266, as portas GPIO podem ser usadas como saída PWM. A precisão de *bits* neste modo varia de acordo com a frequência de PWM selecionada. Para a frequência de PWM padrão de 500 Hz, a precisão de *bits* será de 10 *bits* (ESPRESSIF, 2022b). Isso significa que o pino pode ter um valor de saída de 0 a 1023 (2¹⁰), assim como a entrada analógica, e enviar o valor zero para uma saída PWM representa zerar a largura de pulsos positivos do PWM. Os percentuais variam linearmente de 0 a 1023.

3 METODOLOGIA

3.1 Definição do protótipo

Como já exposto acima, o objetivo deste projeto é desenvolver um sistema de monitoramento e controle de qualidade de ar interno em ambientes fechados. O protótipo projetado apresenta uma série de características funcionais que permite a coleta de dados e a ativação autônoma do sistema de ventilação, quando necessário. As principais características funcionais do protótipo são:

- Sistema de aquisição de dados: o protótipo conta com um sistema de aquisição capaz de coletar informações relevantes para a qualidade do ar interno. Isso inclui a medição da concentração de particulados no ambiente, a concentração de dióxido de carbono, bem como a temperatura e umidade do ar. Esses dados são essenciais para determinar a qualidade do ar e a necessidade de ventilação.
- 2. Sensores integrados: o sistema de aquisição está equipado com sensores adequados para cada uma das variáveis que serão medidas. Foram utilizados sensores de materiais particulados, sensores de CO_2 , sensores de temperatura e sensores de umidade relativa do ar.
- 3. Capacidade de processamento e armazenamento: o protótipo conta com capacidade de processamento para realizar o tratamento dos dados coletados pelos sensores. Além disso, é capaz de armazenar os dados para análises posteriores e para comparações ao longo do tempo. Isso permite um acompanhamento eficiente da qualidade do ar e a identificação de tendências.
- 4. Algoritmo de controle: foi projetado um controlador capaz de analisar os dados coletados e tomar decisões autônomas com base em parâmetros predefinidos. Quando o sistema de ventilação for considerado necessário para melhorar a qualidade do ar interno, o controlador ativa o exaustor de forma automática. Isso garante a circulação adequada do ar e a remoção de contaminantes, mantendo um ambiente interno saudável.
- 5. Integração com sistema de ventilação: o protótipo foi projetado para se integrar com o sistema de ventilação. Isso permite que o controlador ative o exaustor de forma adequada, garantindo uma ventilação eficiente, sempre que necessário.

6. Interface de usuário: o protótipo contém uma interface de usuário intuitiva, que permite a visualização dos dados coletados, das condições atuais do ar interno e das ações realizadas pelo sistema de controle.

As características funcionais do protótipo asseguram um sistema eficiente e autônomo para monitoramento e controle da qualidade do ar interno. Nas subseções seguintes, serão apresentados os componentes escolhidos para compor esse protótipo, visando proporcionar um ambiente interno saudável. Isso inclui ventilação adequada, controle dos níveis de dióxido de carbono, e monitoramento de materiais particulados, temperatura e umidade do ar.

3.1.1 Definição dos sensores

Nesta seção, serão apresentados os transdutores/sensores selecionados para o presente projeto, bem como fornecidas informações detalhadas sobre suas características técnicas e funcionalidades. A escolha adequada dos sensores é essencial para garantir a precisão e confiabilidade das medições realizadas pelo sistema de monitoramento e controle de qualidade do ar interno.

3.1.1.1 Sensor de dióxido de carbono (CO_2)

O dióxido de carbono é um indicador importante da qualidade do ar em ambientes internos. Para medir sua presença e concentração, são utilizados sensores de CO_2 , dispositivos eletrônicos capazes de detectar a presença e medir a concentração desse gás na atmosfera ou em um ambiente fechado. Esses sensores são amplamente utilizados em diversas áreas, como controle de qualidade do ar, sistemas de ventilação e ar condicionado, monitoramento de estufas e armazéns, entre outros.

Para este projeto, foram analisados dois sensores (Figura 9): o SCD30, desenvolvido pela Sensirion (2020), e o T6615-10k, fabricado pela Amphenol (2014). Ambos utilizam a técnica de medição não dispersiva de infravermelho, NDIR, e apresentam diferenças significativas em relação às suas especificações técnicas e aplicações.

O SCD30, conforme demonstrado no Quadro 3, é um sensor de CO_2 de alta precisão, com uma ampla faixa de medição, de 0 a 40.000 ppm. Além disso, ele também é capaz de medir a temperatura e a UR. Com um baixo consumo de energia e interfacess I2C e UART, que permitem fácil integração com microcontroladores, este sensor é indicado para aplicações em que a precisão é fundamental, como o monitoramento da qualidade do ar em edifícios comerciais, residenciais e escolares.

Já o T6615-10k, é um sensor de CO_2 mais simples, com uma faixa de medição de 0 a 10.000 ppm e uma resolução inferior, como demostrado no Quadro 4. Ele não mede a temperatura nem a umidade relativa do ar, além de consumir mais energia que o SCD30.



Fonte: datasheet dos sensores SCD30 e T6615-10K (SENSIRION, 2020; AMPHENOL, 2014).

Quality 3 – Especificações do sensor SOD 30 references ao gas OC	Quadro 3 –	Especificações	do sensor SCD3	0 referentes ao	o gás <i>CO</i>
--	------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------

Parâmetro	Condição	Valor		
Faixa de medição de CO_2	I2C e UART	0 a 40.000 ppm		
Precisão	400 a 10.000 ppm	$\pm (30 \text{ ppm} + 3\% \text{ MV})$		
Repetibilidade	400 a 10.000 ppm	$\pm 10 \text{ ppm}$		
Temperatura de estabilidade	0 a 50°C	\pm 2,5 ppm/°C		
Tempo de resposta	$ au_{63}$	20 segundos		
Consumo de energia	em operação	0,1155 watts		
Fonte: adaptado de Sensirion (2020).				

ιþ

No entanto, o T6615-10k é um sensor com dois canais de medição, que utiliza interface UART, mais robusto e resistente, indicado para aplicações em que a confiabilidade é mais importante do que a precisão, como em sistemas de monitoramento de estufas e incubadoras.

Quadro 4 – Especificações do sensor T66115-10k referentes ao gás CO_2

Parâmetro	Valor		
Faixa de medição de CO_2	0 a 10.000 ppm		
Precisão	75 ppm ou $10%$ da leitura (o que for maior)		
Condições de operação	$0 a 50 \ ^{\circ}\mathrm{C}$		
	0 a 95% UR (sem condensação)		
Tempo de aquecimento	10 minutos		
Tempo de resposta	<2 minutos para maioria das variações		
Consumo de energia	0,1650 watts (em operação)		
Fonte: adaptado de Amphenol (2014).			

Para o desenvolvimento deste protótipo, foi escolhido o SCD30, um sensor que se destaca pela precisão, baixo consumo de energia e ampla faixa de medição de dióxido de carbono, temperatura e umidade relativa. Em comparação com o outro sensor considerado, o SCD30 se mostrou a melhor escolha, não apenas por seus parâmetros técnicos, que incluem um sensor interno de temperatura e umidade relativa, mas também por apresentar um custo inferior conforme detalhado no Apêndice G.

A Figura 10 apresenta o mapeamento dos pinos e o Quadro 5 descreve cada um dos pinos do sensor escolhido.

Figura 10 – Mapeamento dos pinos do SCD30



Fonte: elaborada pelo autor.

Quadro 0 = Descrição dos prilos do SCD 3	Quadro	5 - 5	Descrição	dos	pinos	do	SCD30
--	--------	-------	-----------	-----	-------	----	-------

Pino	Nome	Descrição
1	VCC	Pino de alimentação do sensor.
2	GND	Pino de referência de terra.
3	SCL	Pino de dados bidirecional para comunicação I2C.
4	SDA	Pino de clock para comunicação I2C.
5	RDY	Pino usado para indicar quando o sensor está pronto para leitura.
6	PWM	Saída PWM proporcional à concentração de CO_2 medida pelo sensor.
7	SEL	Pino de seleção de interface.

Fonte: *datasheet* do produto (SENSIRION, 2020).

3.1.1.2 Sensor de temperatura e umidade relativa do ar (UR)

O dispositivo eletrônico designado como sensor de temperatura e umidade relativa do ar tem a finalidade de quantificar as condições ambientais, especificamente, a temperatura e a umidade. É amplamente utilizado em vários setores, como climatização, agricultura e processamento de alimentos, fornecendo informações precisas e em tempo real para o controle de processos e garantindo a segurança e o conforto das pessoas e equipamentos. Existem diferentes tipos de sensores disponíveis, cada um com suas especificidades e limitações. Neste projeto, três sensores foram analisados: SCD30 (SENSIRION, 2020), AHT10 (ASAIR, 2020) e o DHT11 (OSEPP, 2022).
O SCD30 é notável por sua alta precisão de medição de temperatura, com uma incerteza de medição de aproximadamente $\pm 0,4^{\circ}$ C, e umidade relativa do ar, com uma margem de erro de cerca de $\pm 3\%$, como descrito no Quadro 6 e no Quadro 7. Além disso, o SCD30 é capaz de medir uma ampla faixa de temperatura, variando de -40°C a 70°C, e umidade relativa do ar, entre 0% e 100%. Essa precisão é obtida graças aos sensores capacitivos internos presentes no dispositivo, que permitem a leitura precisa e confiável da temperatura e umidade relativa do ar.

Parâmetro	Condição	Valor			
Faixa de medição de temperatura	-	- 40° C até 70° C			
Precisão	0 - 50°C	$\pm (0,4^{\circ}\text{C} + 0,023 \times (\text{T} [^{\circ}\text{C}] - 25^{\circ}\text{C}))$			
Repetibilidade	-	$\pm 0,1^{\circ}\mathrm{C}$			
Tempo de resposta	$ au_{63}$	>10 segundos			
Desvio de precisão	-	$<0,03^{\circ}C/ano$			
Fortes a donte de de Constrier (2020)					

Quadro 6 – Especificações do sensor de temperatura (SCD30)

Fonte: adaptado de Sensirion (2020).

Quadro 7 – Especificações do sensor de umidade relativa do ar (SCD30)

Parâmetro	Condição	Valor
Faixa de medição de umidade	-	0% UR a $100%$ UR
Precisão	25° C, 0 a 100% UR	\pm 3 % UR
Repetibilidade	-	\pm 0,1 $\%$ UR
Tempo de resposta	$ au_{63}$	8 segundos
Desvio de precisao	-	${<}0{,}25~\%$ UR/ano

Fonte: adaptado de Sensirion (2020).

O AHT10 e DHT11, demonstrados na Figura 11 e especificados no Quadro 8, são sensores mais acessíveis em relação à disponibilidade e de valor de mercado, além de amplamente utilizados em prototipagem e projetos de monitoramento e sensoriamento. O AHT10 é um sensor de umidade e temperatura digital de baixo custo, com uma faixa de medição de temperatura de -40°C a 85°C e uma faixa de medição de umidade relativa de 0% a 100%. Ele usa um sensor capacitivo de umidade e um termistor de platina para medir a temperatura. O AHT10 é adequado para aplicações que demandam um sensor confiável e de baixo custo, como é o caso de dispositivos eletrônicos, medidores de umidade portáteis e sistemas de controle de climatização.

Já o DHT11 é um sensor de umidade e temperatura de baixo custo, capaz de medir a temperatura em graus Celsius (°C) e a umidade relativa em porcentagem (%). Ele usa um sensor capacitivo de umidade e um termistor para medir a temperatura. O DHT11 é adequado para aplicações em que a precisão não é um fator crítico, como projetos eletrônicos, sistemas de controle de climatização em pequena escala e monitoramento de plantas em estufas.



Fonte: datasheet dos sensores AHT10 e DHT11 (ASAIR, 2020; OSEPP, 2022)

Medição Parâmetro		AHT 10	DHT 11
	Precisão	$\pm 2\%$ UR	$de \pm 4\%$ UR à $\pm 5\%$ UR
Umidade relativa do ar (UR)	Faixa de operação	0 to 100% UR	de 20% UR à 90% UR
	Tempo de resposta	8 segundos	de 6 até 15 segundos
	Precisão (^o C)	\pm 0.3 °C	$de \pm 1 \ ^{o}C \ \dot{a} \pm 2 \ ^{o}C$
Temperatura ($^{\circ}C$)	Faixa de operação	$-40 \sim 85 \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$	$0 \sim 50 \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$
	Tempo de resposta	de 5 até 30 segundos	de 6 até 30 segundos

Quadro 8 – Especificações do sensor AHT10 e DHT11

Fonte: adaptado dos respectivos datasheet ASAIR (2020) e OSEPP (2022).

O SCD30 e o AHT10 usam uma interface I2C para se comunicar com outros dispositivos, enquanto o DHT11 usa interface digital de um único fio GPIO.

Em resumo, o SCD30 é o sensor mais preciso e com uma ampla faixa de medição, enquanto o AHT10 é um sensor confiável e robusto. Por outro lado, o DHT11 é uma opção de baixo custo com boa precisão para aplicações mais simples.

No projeto em questão, o sensor SCD30 foi utilizado para medir a temperatura e a umidade relativa do ar. Essa escolha se deveu ao fato de que o sensor já incorpora as duas medições, o que reduz custos e componentes, além de possuir alta precisão. Dessa forma, é adequado para uso em aplicações que requerem exatidão, tais como sistemas de controle de qualidade do ar em edifícios, monitoramento de estufas e outras aplicações em que a precisão é essencial.

3.1.1.3 Sensor de material particulado

Um sensor de material particulado mede a quantidade de partículas finas no ar, conhecidas como Particulate Matter (PM). Essas partículas incluem poeira, fumaça, fuligem, aerossóis e outros compostos químicos, que podem ser emitidos naturalmente ou por atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis e a produção industrial (SILVA, 2018). A medição e o controle do material particulado são importantes porque altos níveis de exposição podem causar impactos negativos na saúde humana e ambiental, tornando-se uma preocupação relevante para a saúde pública e a proteção ambiental (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018). Existem diferentes referenciais de frações de material particulado, como o $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$, $PM_{4,0}$ e o PM_{10} , que se referem a partículas com diâmetro menor ou igual a 1 μm , 2,5 μm , 4 μm e 10 μm , respectivamente. A Anvisa recomenda que a soma de aerodispersóides totais no ar seja de no máximo 80 $\mu g/m^3$ (ANVISA, 2003).

Neste trabalho, foi utilizado o sensor HPMA115cO-004 (HONEYWELL, 2021), representado na Figura 12, para medir a quantidade de material particulado no ar, com enfoque na concentração de $PM_{2,5}$. Esse sensor utiliza interface UART para transmissão de dados e emprega a técnica NDIR, que é capaz de detectar outras partículas finas presentes no ar, como $PM_{1,0}$, $PM_{4,0}$ e PM_{10} , embora as medições dessas partículas sejam obtidas a partir da medição de $PM_{2,5}$, utilizando uma relação empírica entre as concentrações. É importante ressaltar que a série HPM de sensores foi especialmente projetada para apresentar alta precisão e ter uma vida útil de 10 anos, conforme evidenciado no Quadro 9.





Fonte: datasheet do sensor HPMA115cO-004 (HONEYWELL, 2021).

Parâmetro		Valor
Faixa de medição de ma	aterial particulado	$0 \ \mu g/m^3 \sim 1,000 \ \mu g/m^3$
Provisão ($25^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$)	$0~\mu g/m^3$ até 100 $\mu g/m^3$	$ PM_{2,5}: \pm 15 \mu g/m^3; PM_{1,0}, PM_{4,0}, PM_{10}: \pm 25 \ \mu g/m^3 $
$1 \text{ recisao} (20 \text{ C} \pm 5 \text{ C})$	$100 \ \mu g/m^3$ até $1000 \ \mu g/m^3$	$PM_{2,5}$: ±15 %; $PM_{1,0}$, $PM_{4,0}$, PM_{10} : ±25%;
Temperatura de operaçã	ão	$-20^{\circ}\mathrm{C} \sim 70^{\circ}\mathrm{C}$
Umidade de operação		0 % UR ~95% UR, sem condensação
Tempo de resposta		<6 segundos
Vida útil		10 anos em modo contínuo
Fonte: adaptado de H		onevwell (2021).

Quadro 9 – Especificações do sensor de material particulado

A Figura 13 apresenta o mapeamento dos pinos e o Quadro 10 descreve cada um dos pinos do sensor escolhido.

3.1.2 Definição dos atuadores

Nesta seção, serão apresentados os componentes atuadores selecionados para compor o sistema de ventilação do presente projeto. Os atuadores desempenham um papel

Figura 13 – Mapeamento dos pinos do HPMA115cO-004

10	CET	TV	9
8	SEI	IX	7
-	N/A	RX	-
6	N/A	RES	5
4	CNID	CNID	3
2	GND	GND	1
2	VCC	Vout	-
6 4 2	N/A N/A GND VCC	RX - RES - GND - Vout -	5 3 1

Fonte: elaborada pelo autor.

Quadro 10 – Descrição dos pinos do HPMA115cO-004

Pino	Nome	Descrição			
1	Vout	Este pino é a saída analógica do sensor. Ele fornece uma tensão			
I Vout		proporcional à concentração de partículas no ar.			
2	VCC	Pino de alimentação do sensor.			
3 e 4	GND	Pino de referência de terra.			
5	RES	Reservado para uso futuro.			
6 e 8	N/A	Não aplicável.			
7	RX	Pino de recepção de dados (UART).			
9	TX	Pino de envio de dados (UART).			
10	SET	Reservado para uso futuro.			
	Fonto: datasheet do produto (HONEVWELL 2021)				

Fonte: *datasheet* do produto (HONEYWELL, 2021).

fundamental ao permitir o controle e ajuste adequado da ventilação do ambiente, conforme as necessidades identificadas pelo processamento da informação coletada pelos sensores.

3.1.2.1 Módulo de controle de potência

Conforme destacado por Zhang e Chung (2014), o módulo de controle de potência, também conhecido como *dimmer*, é um dispositivo capaz de ajustar a potência fornecida a uma carga elétrica. Por exemplo, é possível controlar a intensidade da corrente elétrica que flui para uma lâmpada. Uma forma comum de implementar um *dimmer* é utilizando um componente eletrônico chamado TRIAC, que é capaz de conduzir corrente elétrica em ambas as direções, permitindo o controle de fase ou potência.

O TRIAC é composto por três terminais: MT_1 , MT_2 e gate (G), conforme apresentado na Figura 14. Quando uma tensão ou corrente é aplicada ao terminal gate, o TRIAC começa a conduzir corrente elétrica entre os terminais MT_1 e MT_2 . Essa condução é mantida até que a corrente que circula pelo TRIAC chegue a zero (TOMEI, 2014).

O ajuste da intensidade luminosa ou do fornecimento de energia elétrica é realizado por meio da largura do pulso ($duty \ cycle$) da corrente elétrica que flui para a carga. O $duty \ cycle$ representa o lapso temporal necessário para que a corrente elétrica flua até a





Fonte: adaptado de Tomei (2014).

carga em relação ao tempo total de um ciclo de onda elétrica. Quanto maior o *duty cycle*, maior a energia entregue para a carga. Esse ajuste é aplicado na porta gate do TRIAC, por meio do sinal PWM, cujo comportamento é explicado na subseção 2.4.6.1.

Para o controle da velocidade do exaustor neste projeto, foi utilizado o DM02A, da MSS Eletrônica, que pode ser visualizado na Figura 15. Esse dispositivo ajusta a rotação do exaustor, de acordo com a potência fornecida, permitindo que a carga suportada chegue a até 400 watts. No entanto, é importante lembrar que, caso não haja informações precisas sobre o fator de potência, é aconselhável trabalhar com 60% desse valor, ou seja, uma carga máxima de 120 watts para uma tensão de entrada 127 Volts, e 240 watts para 220 volts. No Quadro 11, verificam-se as especificações elétricas deste dispositivo.

Figura 15 – Módulo de controle de potência



Fonte: datasheet do módulo DM02A (MSS ELETRÔNICA, 2020).

O DM02A possui 70 níveis de dimerização para cada canal, permitindo um controle da intensidade da luz ou da carga elétrica. O ajuste do nível desejado é feito a partir da seleção do canal a ser controlado, enviando um pulso entre 500 e 35000 μs , em que cada 500 μs corresponde a um nível de dimerização. Além disso, o dispositivo sincroniza automaticamente com a rede elétrica, garantindo que a intensidade seja mantida constante mesmo em condições de variação de tensão (MSS ELETRÔNICA, 2020).

A Figura 16 apresenta o mapeamento dos pinos e o Quadro 12 descreve cada um dos pinos do módulo de controle de potência escolhido.

Tensão da parte da carga	$127 Vac//220 Vac$, (90V \sim 240V) 60Hz
Tensão da parte de controle	3.3Vdc ou 5Vdc ($3V \sim 5V$)
Potência em relação a tensão de entrada	$120\mathrm{W}$ para $127\mathrm{V}$ e $240\mathrm{W}$ em $220\mathrm{V}$
Fonte: datasheet do módulo DM02	A (MSS ELETRÔNICA, 2020).

Quadro 11 – Especificações dimmer

10	EVCE	D.2 1	1
11	FASE	DZ+	2
12	NEUTRO	B2-	3
13	SAIDA 2	B1+	Δ
1.1	NEUTRO	B1-	-
14	SAIDA 1	EN	5
15	NEUTRO	СН	6
		SIG	7
		VCC	8
		GND	9
		GND	

Figura 16 – Mapeamento dos pinos do DM02A

Fonte: elaborada pelo autor.

0 1	10	D ·	~	1	•	1	DILOOA
Onadro	12 -	Descrit	າສດ (105	ninos	do.	$10 \text{ M} \text{H}^2 \text{A}$
&uaa10	14	DCDCIIC	_z ao (100	pinos	ao	D10211

Pino	Nome	Descrição	
1	B2+	Incrementa em 1 nível sinal de controle do canal 2.	
2	B2-	Decrementa em 1 nível sinal de controle do canal 2.	
3	B1+	Incrementa em 1 nível sinal de controle do canal 1.	
4	B1-	Decrementa em 1 nível sinal de controle do canal 1.	
5	EN	Habilita a recepção do sinal no pino SIG.	
6	CH	Seleciona qual canal irá receber o comando.	
7	SIG	Sinal de controle (PWM).	
8	VCC	Pino de alimentação do sensor.	
9	GND	Pino de referência de terra.	
10	FASE	Fio fase da rede elétrica.	
11,13 e 15	NEUTRO	Fio neutro.	
12	SAIDA 2	Saída do canal.	
14	SAIDA 1	Saída do canal 1.	

Fonte: datasheet do módulo DM02A (MSS ELETRÔNICA, 2020).

Em resumo, o DM02A é uma boa escolha para controlar a velocidade dos motores em nosso projeto, oferecendo alta precisão, segurança e facilidade de uso.

3.1.2.2 Exaustor

Um exaustor desempenha o importante papel de eliminar ar indesejado, fumaça, gases e partículas de ambientes fechados, conforme indicado por Brasfaiber (2023). Ele encontra aplicação em uma ampla gama de locais, incluindo cozinhas, banheiros, fábricas e outros espaços que necessitam de ventilação para manter a qualidade do ar. No âmbito deste projeto, será empregado um exaustor com potência regulada por um *dimmer* para assegurar a renovação apropriada do ar.

A seleção do exaustor mais adequado para cada ambiente requer uma análise de dimensionamento e a busca por diretrizes oferecidas por órgãos especializados. Por exemplo, a necessidade de renovar o ar em uma sala de aula com cerca de 17 pessoas é de 602 metros cúbicos por hora, conforme estabelecido na Apêndice E deste estudo. Desse modo, é fundamental levar em consideração esses parâmetros, a fim de garantir a eficiência do exaustor e a qualidade do ar no recinto.

O exaustor Modelo AXC 250A - INDUSTRIAL (MULTIVAC, 2017), representado na Figura 17 e detalhado no Quadro 13, atende satisfatoriamente a essa demanda, uma vez que possui a capacidade de renovar até 925 metros cúbicos de ar por hora.





Fonte: elaborada pelo autor.

Quadro 13 – Especificações exaustor

Parâmetro	Valor
Vazão máxima	$925 \text{ m}^{3}/\text{h}$
Pressão máxima	570 Pa
Nível de ruído	62 dBA
Potência	$160 \mathrm{W}$
nto: adaptado do M	ultivac (2017

Fonte: adaptado de Multivac (2017).

3.1.3 Definição do microcontrolador

Para a seleção do microcontrolador a ser utilizado neste projeto, foram analisadas três opções amplamente conhecidas e difundidas no mercado de tecnologia: ATmega328P (ARDUINO.CC, 2022), ESP32 (ESPRESSIF, 2022a) e ESP8266 (ESPRESSIF, 2022b).

Na Figura 18, são apresentadas três plataformas *open-source* para Internet das Coisas: o Arduino Uno R3, baseado no microcontrolador ATmega328P, e o NodeMCU, uma plataforma de IoT que pode ser equipada tanto com o microcontrolador ESP32 quanto com o ESP8266.

Figura 18 – Plataformas de internet das coisas



Fonte: elaborada pelo autor.

O ATmega328P, como microcontrolador, não possui interface *wifi* nativa e é limitado no quesito memória, razão pela qual foi descartado como opção para este projeto.

Ao comparar os dois microcontroladores com módulo *wifi* embutido, ambos fabricados pela Expressif, percebe-se que o ESP32 possui vantagens de hardware em praticamente todos os aspectos analisados em relação ao ESP8266, que, no entanto, atende às especificações exigidas pelo sistema em termos de memória, processamento e quantidade de pinos disponíveis. Além disso, possui um custo mais baixo em comparação com os outros modelos, o que justifica a sua escolha para a execução deste projeto. A análise detalhada dos microcontroladores apresentada no Quadro 14 revela que apenas o ESP32 e o ESP8266 são adequados para atender às necessidades específicas do projeto.

A Figura 19 apresenta o mapeamento dos pinos e o Quadro 15 descreve cada um dos pinos do microcontrolador escolhido.

	ATmega328P	ESP32	ESP8266
Núcleos de	1	9	1
processamento	L		1
Arquitetura	8 bits	32 bits	32 bits
Clock	16MHz	160MHz	80MHz
RAM	2KB	512KB	160KB
FLASH	32KB	16MB	16MB
Wifi	Não	Sim	Sim
Bluetooth	Não	4.2 e BLE	Não
GPIO	14	36	17
Interfaces	SPI / I2C / UART	SPI / I2C / UART I2S / CAN	SPI / I2C / UART / I2S

Quadro 14 – Comparativo microcontroladores

Fonte: *datasheet* dos dispositivos (ARDUINO.CC, 2022; ESPRESSIF, 2022a; ESPRESSIF, 2022b)

1	10		DO	5
2	AU	\smile	DO	6
2	GND		D1	7
	VU		D2	
4	53		БЗ	8
5	55		5	5
6	52		D4	6
7	S1		3V	7
	SC		GND	
8	50		D5	8
9	50		55	5
10	SK		D6	6
10	GND		D7	0
11	214		50	7
12	3V		08	0
12	EN		RX	-
13	RST		тх	5
14	CNID		CNID	6
15	GND		GND	7
	VCC		3V	<u> </u>

Figura 19 – Mapeamento dos pinos do NodeMCU (ESP8266).

Fonte: elaborada pelo autor.

Pino	Nome	Descrição	
1	A0	ADC de 10 bits.	
2, 10, 14, 22 e 29	GND	Pino de referência de terra.	
3	VU	Indica a tensão de entrada do módulo.	
4, 5 e 6	S3, Se e S1	GPIO 10: GPIO 9 e GPIO 8, respectivamente.	
7, 8 e 9	SC, S0 e SK	GPIO 11: GPIO 7 e GPIO 6, respectivamente.	
11, 21 e 30	3V	Saída de 3,3 V de um regulador de tensão integrado.	
12 e 13	EN e RST	<i>Enable</i> e <i>reset</i> , respectivamente.	
15	VCC	Pino de alimentação do dispositivo.	
16	D0	Usado para "despertar" do modo de economia de energia.	
17	D1	GPIO 5: SCL da interface I2C e pode ser I/O	
18	D2	GPIO 4: SDA da interface I2C, pode ser I/O e PWM	
19 e 20	D3 e D4	GPIO 0 e GPIO 2: apenas <i>output</i> .	
23 e 24	D5 e D6	GPIO 14 e GPIO 12: pode ser I/O e PWM.	
25	D7	GPIO 13: pode ser I/O.	
26	D8	GPIO 15: apenas <i>output</i> e pode ser PWM.	
27	RX	GPIO 3: apenas <i>input</i> , receptor da interface UART.	
28	TX	GPIO 1: apenas <i>output</i> , transmissor da interface UART.	

Quadro15– Descrição dos pinos do Node
MCU

Fonte: datasheet do produto (ESPRESSIF, 2022b).

3.2 Montagem do protótipo inicial

O sistema de aquisição de dados é composto pelo microcontrolador ESP8266, desempenhando um papel fundamental no processamento das informações obtidas pelos sensores HPMA115 e SCD30. Além dos sensores, o protótipo também integra o sistema de ventilação por meio do módulo DM02A, permitindo o controle da intensidade do exaustor, de acordo com as condições detectadas pelos sensores. A Figura 20 apresenta o diagrama de blocos, ilustrando os elementos e a forma de comunicação interna do protótipo. Já a Figura 21, mostra o diagrama esquemático inicial do mesmo.

Figura 20 – Diagrama de blocos do protótipo



Fonte: elaborada pelo autor.





Fonte: elaborada pelo autor.

Nesta seção, será abordada a versão inicial do protótipo, enquanto na seção 3.7 será apresentada a versão final, com os ajustes necessários para o pleno funcionamento do exaustor.

3.3 Desenvolvimento do firmware

Neste projeto, o microcontrolador ESP8266 foi utilizado. Ele possui 160 KB de memória RAM, que foi utilizada para armazenar as variáveis criadas e atualizadas dinamicamente durante a execução do programa. Além disso, o microcontrolador conta com 16 MB de memória FLASH, que foi utilizada para armazenar o código do *firmware*.

Para que uma unidade de processamento execute uma tarefa, é necessária uma sequência de instruções que indique quais posições da área de memória serão utilizadas.

Os *firmwares* são softwares embarcados que ficam armazenados em memórias conhecidas como "memórias de programa". Eles exercem função primordial na inicialização e configuração das funções que o hardware irá executar.

No desenvolvimento deste projeto, optou-se por utilizar a IDE do Arduino, que utiliza a linguagem C++ e possui um compilador específico para o microcontrolador ESP8266. Além disso, foram incluídas bibliotecas de terceiros no projeto para complementar as funcionalidades dos módulos periféricos.

3.3.1 Bibliotecas

As bibliotecas desempenham papel fundamental em projetos de Arduino, pois simplificam o processo de programação e fornecem funcionalidades pré-definidas.

Neste projeto, foram empregadas as bibliotecas de código aberto mencionadas no Código 3.1.

1	#include	<esp8266wifi.h></esp8266wifi.h>	//	Comunicação wifi do ESP8266
2	<pre>#include</pre>	<pubsubclient.h></pubsubclient.h>	//	PubSubClient(MQTT)
3	<pre>#include</pre>	<wire.h></wire.h>	//	Comunicação I2C
4	<pre>#include</pre>	<softwareserial.h></softwareserial.h>	//	Comunicação serial
5	<pre>#include</pre>	<arduinojson.h></arduinojson.h>	//	Manuseio de dados JSON
6	<pre>#include</pre>	<hpma115c0.h></hpma115c0.h>	//	Comunicação com sensor hpma115C
7	<pre>#include</pre>	<sparkfun_scd30_arduino_library.h></sparkfun_scd30_arduino_library.h>	//	Comunicação com sensor SCD30
8	<pre>#include</pre>	<dm02a.h></dm02a.h>	//	Comunicação com atuador DM02A

Código 3.1 – Bibliotecas utilizadas no firmware

A biblioteca $\langle ESP8266WiFi.h \rangle$ é incluída ao instalar o módulo ESP8266 em projetos Arduino. Ela permite a conexão *wifi* e fornece funções para estabelecer conexões com redes *wifi*, configurar o módulo e enviar e receber dados pela rede, além de oferecer outras funcionalidades relacionadas à conectividade.

Já a biblioteca <**PubSubClient.h>** é uma implementação MQTT para o Arduino (O'LEARY, 2020). Ela facilita a publicação e a subscrição de mensagens em um servidor MQTT, de modo que constitui ferramenta especialmente útil em projetos que envolvem a troca de informações entre dispositivos conectados à Internet. Com o uso dessa biblioteca, é possível enviar e receber dados de forma assíncrona.

No Arduino, a biblioteca <Wire.h> é integrada, de maneira que permite a comunicação I2C entre dispositivos. Ela fornece funções para enviar e receber dados utilizando o protocolo I2C, propiciando a interconexão de vários dispositivos compatíveis com I2C. Outra biblioteca importante é a <SoftwareSerial.h>, também integrada, que é usada para criar portas seriais adicionais no Arduino. Com essa biblioteca, é possível emular portas seriais nos pinos digitais, o que possibilita a comunicação com dispositivos externos.

A biblioteca **ArduinoJson.h>** é útil para trabalhar com *JavaScript Object Notation* (JSON) em projetos Arduino (BLANCHON, 2023). O JSON é um formato de dados amplamente utilizado na troca de informações entre dispositivos e aplicativos web. Ela facilita a análise e criação de dados JSON de maneira eficiente, além de simplificar a comunicação entre o Arduino e outros dispositivos ou serviços que utilizam esse padrão de dados.

Além dessas bibliotecas, existem outras específicas para diferentes sensores. Um exemplo disso é a <hpma115C0.h> (RANGELOV, 2020), desenvolvida para o sensor de partículas HPMA115cO-004, que permite inicializar o sensor, ler os dados das partículas e interpretar as informações recebidas. Outrossim, convém mencionar a biblioteca <SparkFun_SCD30_Arduino_Library.h> (ELECTRONICS, 2022), criada para simplificar a comunicação com o sensor de dióxido de carbono SCD30, fornecendo funções para a leitura dos dados de CO_2 , umidade e temperatura.

Por fim, a biblioteca <DM02A.h> foi desenvolvida para ser utilizada com o módulo DM02A, um *dimmer* (ELETRÔNICA, 2019), e simplificar o processo de programação, ao disponibilizar funções e métodos pré-definidos que permitem aos desenvolvedores controlar o *dimmer* de maneira eficiente e precisa.

No conjunto, essas bibliotecas desempenham função essencial no projeto, pois proporcionam funcionalidades específicas para cada sensor e simplificam a interação e o controle dos dispositivos utilizados.

3.3.2 Estrutura do firmware

A estrutura do código segue um padrão que inclui duas funções principais: setup() e loop(), cujo emprego é basilar na inicialização e na execução contínua do programa.

3.3.2.1 Função setup()

No Código 3.2, é apresentada a função setup(), cujo fluxograma correspondente pode ser visualizado na Figura 22. Ela desempenha o papel de invocar outras funções para configurar e preparar o ambiente necessário à execução do programa. É nela que ocorrem as definições iniciais, como a configuração de pinos, a inicialização de variáveis e a definição de parâmetros. Essas etapas garantem que o programa esteja pronto para executar as tarefas designadas.

1	<pre>void setup()</pre>
2	{
3	<pre>initSerial();</pre>
4	<pre>initWiFi();</pre>
5	<pre>initMQTT();</pre>
6	<pre>initSCD();</pre>
7	<pre>initHPM();</pre>
8	<pre>initDimmer();</pre>
9	}

A inicialização do programa envolve a configuração de várias funções essenciais. A função initSerial() é responsável por estabelecer a comunicação serial e definir a taxa de transmissão do microcontrolador. Em seguida, a função initWiFi() é chamada para estabelecer a conexão *wifi*, fornecendo o nome da rede (SSID) e a senha como parâmetros. Isso atribui um endereço IP ao dispositivo ESP8266. A função initMQTT() é utilizada para instanciar o cliente MQTT e definir os parâmetros de conexão, como o host e a porta correspondentes.



Fonte: elaborada pelo autor.

Outras funções importantes incluem initSCD() e initHPM(). A função initSCD() é responsável pela inicialização do sensor SCD30 e verifica se ele foi inicializado corretamente. Caso contrário, uma mensagem de erro é exibida na monitoração serial e uma tentativa de inicialização é feita em loop. Por sua vez, a função initHPM() configura a taxa de transmissão do sensor e define as portas GPIO para a comunicação serial. Por fim, a função initDimmer() inicializa o atuador, definindo a saída PWM inicialmente como zero, garantindo que o exaustor esteja sempre desligado ao iniciar o programa. Essas etapas de inicialização são cruciais para o correto funcionamento do sistema, permitindo depuração, monitoramento e estabelecendo as conexões necessárias para o bom desempenho do dispositivo.

3.3.2.2 Função loop()

A função loop(), apresentada no Código 3.3, desempenha um papel crucial no controle contínuo do microcontrolador após a execução da função setup().

```
1 void loop()
   {
 2
       VerificaConexoesWiFIEMQTT();
 3
       readSCD();
 4
       readHPM();
 \mathbf{5}
       automacao_exaustor();
 6
       publisher();
 7
 8
       delay(40000);
 9
10
11
       MQTT.loop();
12 }
```

Ela é responsável por executar as ações centrais do programa e governar o comportamento do microcontrolador ao longo do tempo. Dentro dessa função, ocorrem várias tarefas, como a leitura dos sensores, o processamento dos dados obtidos, a geração de saídas e a tomada de decisões com base em condições e dados coletados, conforme ilustrado na Figura 23.

A função loop() exerce atribuição central no sistema, chamando várias outras funções que são essenciais para o seu correto funcionamento.

Uma dessas funções é a VerificaConexoesWiFIEMQTT(), responsável por garantir que o dispositivo esteja conectado à rede *wifi* e ao servidor MQTT. Ela valida se a conexão *wifi* está estabelecida e, consequentemente, se o MQTT também está conectado. Caso uma dessas conexões não esteja estabelecida, o código tentará reconectar para assegurar uma comunicação adequada.

Outra função importante é a readSCD(), que verifica se há dados disponíveis no sensor SCD30. Ela coleta esses dados e os armazena nas variáveis correspondentes de dióxido de carbono, temperatura e umidade. Caso não haja dados disponíveis, a



Fonte: elaborada pelo autor.

função imprime uma mensagem na saída de monitoramento serial, informando que está aguardando dados do sensor.

A função readHPM() realiza uma requisição de informações através da porta de transmissão (TX) e recebe as informações do sensor na porta de recepção (RX). Em seguida, essa informação é armazenada na variável correspondente de material particulado: $PM_{2,5}$. Caso ocorra algum erro durante a leitura, uma mensagem de erro é exibida na saída de monitoramento serial.

A função automacao_exaustor() é responsável por implementar a estratégia de DCV. Essa estratégia envolve a aplicação de dois métodos distintos de controle, os quais serão detalhadamente abordados na seção 4.1: ligar/desligar em momentos específicos e controle proporcional puro. Essa função decide em qual nível o exaustor deve operar, considerando tanto o nível de CO_2 quanto o método de controle empregado

A função publisher() visa construir um objeto JSON que consolida todas as variáveis das grandezas obtidas nas etapas anteriores em uma mensagem, sendo esta posteriormente enviada para a internet, especificamente para o servidor MQTT.

Além disso, há um delay estabelecido para que cada loop demore aproximadamente 1 minuto, levando em consideração o tempo de execução do loop somado ao delay.

Por fim, a função MQTT.loop() atua como um *keep alive*, mantendo a comunicação entre o dispositivo e o servidor MQTT, garantindo que a conexão permaneça ativa.

3.4 Metodologia de obtenção de dados

A aquisição de dados em um sistema de IoT depende tanto da coleta precisa realizada pelos sensores quanto da transmissão confiável por meio da mensageria, conhecida como *broker*. A mensageria desempenha um papel crucial ao garantir a transmissão eficiente e segura dos dados coletados pelos sensores para os sistemas responsáveis pela disponibilização e armazenamento. Além disso, possibilita a comunicação assíncrona entre os componentes da solução proposta, oferecendo recursos avançados, como filas de mensagens, tópicos de publicação/assinatura e garantia de entrega e persistência das mensagens. Esses recursos contribuem para a eficiência e confiabilidade na aquisição de dados.

3.4.1 Protocolo de comunicação: MQTT

Neste projeto, adota-se o protocolo MQTT devido à sua leveza, eficiência e capacidade de lidar com comunicações assíncronas. Amplamente utilizado em IoT, esse protocolo facilita a troca eficiente de informações entre dispositivos conectados.

Criado nos anos 90 pela IBM (2021), o MQTT é um protocolo de comunicação máquina-a-máquina baseado no protocolo TCP/IP. Sua arquitetura centralizada no modelo *publish-subscribe* (publicar-assinar) permite que dispositivos troquem informações através de um servidor intermediário chamado *broker*.

No MQTT, os dispositivos desempenham papéis distintos: os produtores (pu-blishers) enviam mensagens ao *broker*, enquanto os consumidores (*subscribers*) se inscrevem em tópicos específicos para receber as mensagens. Essa abordagem possibilita uma comunicação assíncrona eficiente, em que os dispositivos podem enviar e receber dados de maneira independente (MQTT, 2022).

Os dados são organizados em tópicos, que funcionam como canais virtuais de comunicação. Cada mensagem enviada pelo *publisher* é associada a um tópico específico. Os *subscribers* podem escolher quais tópicos desejam assinar, recebendo apenas as mensagens relacionadas a esses tópicos. Essa flexibilidade torna o MQTT altamente escalável e adequado para ambientes com muitos dispositivos e fluxos de dados variados.

Neste projeto em particular, foi implementado um servidor *broker* responsável por gerenciar as mensagens. Os dados coletados pelos sensores são processados pelo microcontrolador e formatados em mensagens utilizando o formato leve e estruturado JSON. Em seguida, essas mensagens são publicadas no *broker*, que as distribui para os *subscribers* inscritos nos respectivos tópicos. Este fluxo está demonstrado na Figura 24.

É importante ressaltar que, para simplificar a implementação e reduzir a demanda de recursos, o *Controle de qualidade de serviço* (QoS) do MQTT foi desativado neste



Figura 24 – Funcionamento protocolo MQTT

Fonte: adaptado de MQTT (2022).

contexto específico. O QoS é responsável por garantir a entrega confiável das mensagens, oferecendo diferentes níveis de garantia, como entrega garantida e ordem de entrega.

3.5 Metodologia de disponibilização e armazenamento de dados

A metodologia de disponibilização e armazenamento de dados é de suma importância na implementação de sistemas no contexto de IoT. Com o surgimento desse conceito, houve um aumento significativo na implantação de sensores em diversos ambientes, visando a coleta e transmissão eficiente de informações. Nesse sentido, é fundamental a criação de painéis, também conhecidos como *dashboards*, para apresentar esses dados aos usuários finais. Além disso, é imprescindível contar com um banco de dados confiável, escalável e seguro, capaz de lidar com grandes volumes de dados em tempo real. Essa abordagem garante a integridade e disponibilidade das informações ao longo do tempo, facilitando a visualização, análise e tomada de decisões assertivas com base nos dados gerados pelos dispositivos (PIRES et al., 2015).

Nesta seção, serão exploradas as ferramentas específicas utilizadas para a disponibilização e o armazenamento eficiente desses dados.

3.5.1 Interface gráfica: Node-red

O Node-RED é uma ferramenta de programação visual de código aberto desenvolvida pela IBM (2021). Inicialmente criada para dispositivos IoT, ela evoluiu para ser usada em hardware, APIs e serviços web. O editor do Node-RED é baseado na plataforma Node.js, que é um ambiente de execução de código JavaScript no lado do servidor. Isso permite a execução de código JavaScript fora do navegador, criando uma interface HTML compatível com diversos navegadores. Além disso, oferece uma interface gráfica que permite aos usuários criar fluxos de trabalho conectando nós, representando dispositivos, serviços e funções variados para a manipulação de dados (OPENJS, 2022).



Figura 25 – Conexões dos nós no node-red

Fonte: elaborada pelo autor.

O Node-RED apresenta uma interface web que permite arrastar e conectar blocos ou nós, facilitando a conexão e coleta de dados de sensores. Também é possível configurar e personalizar cada nó de acordo com as necessidades do projeto. Após a coleta dos dados, o Node-RED oferece um conjunto de nós para processamento e manipulação, incluindo filtragem, transformação, cálculos, agregação e visualização dos dados coletados pelos sensores. Além disso, possibilita o envio desses dados para um banco de dados, permitindo o armazenamento e a recuperação posterior das informações.

Na Figura 25, é exposto o arranjo dos nós neste projeto. O nó tccaiq é um módulo de entrada que se conecta ao servidor MQTT e faz um *subscriber* em um tópico. Toda informação publicada nesse tópico chega em formato de string. Este nó está conectado a outros três nós: o nó json, que reformata a mensagem para JSON e encaminha para o armazenamento no banco de dados; a função última_leitura, que registra na interface gráfica o horário da última vez que uma leitura foi recebida do broker; e a função separa_variaveis, que converte o conteúdo da string em objetos JavaScript, separando cada objeto em uma variável, como demonstrado no Código 3.4.

Código 3.4 – Função que aloca objetos em variáveis

```
1 var variaveis = msg.payload;
2 var data = JSON.parse(variaveis);
3 
4 // Atribuir cada parâmetro a uma saída
5 var ID= {payload: data.ID};
6 var Temperatura = { payload: data.Temperatura };
7 var Umidade = { payload: data.Umidade };
8 var CO2 = { payload: data.CO2 };
```

```
9 var PM_1 = { payload: data.PM_1 };
10 var PM_2_5 = { payload: data.PM_2_5 };
11 var Nivel = { payload: data.Nivel };
12 var PM_10 = { payload: data.PM_10 };
13 return [ID, Temperatura, Umidade, CO2, PM_1, PM_2_5, Nivel, PM_10];
```

Após o processamento dos dados, o Node-RED oferece diversas opções para disponibilizar os resultados. É possível criar *dashboards* para visualização em tempo real e enviar notificações por e-mail ou mensagens. O uso desses painéis simplifica a visualização e análise dos dados gerados pelos dispositivos de IoT, tornando as informações coletadas pelos sensores compreensíveis e claras para os usuários finais (Figura 26). Com essa variedade de recursos, o Node-RED se torna uma ferramenta poderosa para a integração, coleta, processamento e divulgação dos dados de sensoriamento. Essa solução proporciona insights imediatos sobre o desempenho e status dos dispositivos, viabilizando a tomada de decisões.



Figura 26 – Dashboard



3.5.2 Banco de dados: InfluxDB

O armazenamento de dados assume função de notável destaque, pois é essencial contar com um banco de dados confiável, escalável e capaz de lidar com grandes volumes de dados provenientes de dispositivos de IoT em tempo real. Além disso, é fundamental que esse banco de dados ofereça mecanismos eficientes de armazenamento e recuperação, garantindo acesso rápido às informações necessárias, segurança e integridade dos dados ao longo do tempo, possibilitando análises posteriores e melhorando a tomada de decisões.

Para atender às demandas específicas de séries temporais, é crucial utilizar um *Banco de dados de séries temporais* (TSDB) com alto desempenho de gravação, localização ágil de dados, compactação eficiente e escalabilidade fácil. O InfluxDB, um TSDB de código aberto, é uma solução ideal para lidar com grandes volumes de consultas e gravações por segundo, minimizando o impacto no sistema operacional. Ele armazena séries temporais de métricas, eventos ou medições com carimbo de data/hora e se destaca por sua capacidade de compressão de dados, facilitando a escalabilidade do banco de dados (NAQVI; YFANTIDOU, 2018).

Ao utilizar o InfluxDB em conjunto com o Node-RED, é possível receber e armazenar de forma adequada a sequência de dados provenientes dos dispositivos de IoT. A configuração correta do banco de dados permite o fluxo contínuo dos dados, possibilitando análises posteriores. Além disso, o InfluxDB oferece recursos avançados, como a agregação de dados em intervalos de tempo específicos e a capacidade de realizar consultas em janelas de tempo deslizantes por meio da *Influx Query Language* (InfluxQL), uma sintaxe de consulta similar ao SQL (INFLUXDATA, 2023). Esses recursos aprimoram a análise e a compreensão dos dados coletados, proporcionando valiosos insights.

Em resumo, o InfluxDB é uma solução eficiente e versátil de TSDB. Ele é capaz de lidar com dados em tempo real, oferecendo escalabilidade e facilidade de consulta. Nesse contexto, o InfluxDB se apresenta como a escolha ideal para o armazenamento de séries temporais neste projeto.

3.6 Fluxo da informação no sistema

A Figura 27 ilustra o fluxo de informação necessário para compreender o funcionamento desse sistema. No protótipo, os dados ambientais, como temperatura, umidade, nível de CO_2 e material particulado, são coletados por sensores. Esses dispositivos capturam as informações e as enviam para o microcontrolador ESP8266, que atua como uma ponte entre os sensores, o atuador e o servidor *broker MQTT* na *internet*, permitindo a transmissão dos dados coletados por meio do protocolo MQTT, utilizando a conexão *wifi*.

Na internet, o broker MQTT recebe os dados provenientes do microcontrolador,



Figura 27 – Fluxo da informação no sistema

Fonte: elaborada pelo autor.

por meio de mensagens no formato JSON do tipo *publish*. Ele atua como intermediário, recebendo as mensagens dos dispositivos que publicam os dados (*publishers*) e as encaminhando para os dispositivos que assinam essas informações (*subscribers*).

No servidor Node-RED, as mensagens vindas do *broker MQTT* são capturadas e processadas. As informações são disponibilizadas em um *dashboard* acessível por meio de uma interface *web* HTTP, permitindo que os usuários monitorem e visualizem os dados coletados. Além disso, o Node-RED armazena essas informações em um banco de dados InfluxDB, executando interações por meio da linguagem InfluxQL.

Em resumo, nesse sistema de IoT, os sensores coletam os dados, que são transmitidos para o microcontrolador ESP8266. Em seguida, o microcontrolador utiliza o protocolo MQTT para enviar essas informações ao *broker MQTT*, que as encaminha para o ambiente do Node-RED. No Node-RED, as mensagens são processadas, exibidas em um *dashboard* e armazenadas no banco de dados InfluxDB.

3.7 Controle de velocidade do ventilador monofásico

Os ensaios de caracterização do ventilador monofásico apresentaram desafios em relação à linearidade. Para contornar este problema, conforme descrito no Apêndice A, foi necessário adicionar uma carga indutiva de 220,1 mH, mostrado na. O esquemático elétrico correspondente é ilustrado na Figura 29.

Para estabelecer uma correlação entre o nível de controle e a concentração de CO_2 , informação necessária para automatizar a resposta do sistema, procedeu-se primeiramente com a análise da resposta do exaustor [m/s] para diferentes níveis de controle (Figura A.6). Com base nessa análise, determinou-se que o sistema seria acionado a partir do nível de controle 15, quando a concentração de CO_2 atingisse 800 ppm, resultando em uma



Figura 28 – Montagem do protótipo

Fonte : elaborada pelo autor.





Fonte: elaborada pelo autor.

velocidade de descarga do exaustor de 1,83 m/s. A atuação máxima seria alcançada no nível 70, com uma velocidade de exaustão de 17,5 m/s, quando a concentração de gás atingisse ou ultrapassasse 1000 ppm.

A Tabela 1 apresenta a correlação entre os níveis de concentração de CO_2 e o nível a ser estabelecido pelo controlador.

Concentração de CO_2 [ppm]	Nível do controlador
menor que 800	0
entre 800 e 819	15
entre 820 e 839	21
entre 840 e 859	26
entre 860 e 879	32
entre 890 e 899	37
entre 900 e 919	43
entre 920 e 939	48
entre 940 e 959	54
entre 960 e 979	59
entre 980 e 999	65
maior que 999	70

Tabela 1 – Relação entre concentração de ${\cal CO}_2$ e o nível do controlador

Fonte: elaborada pelo autor.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaios de validação

A eficácia de qualquer sistema de monitoramento e controle de qualidade do ar interno depende diretamente da validação de suas funcionalidades e desempenho. Neste capítulo, serão abordados os ensaios de validação executados para avaliar a solução proposta. Esses ensaios foram projetados para verificar a eficiência energética e a capacidade do sistema em regular a qualidade do ar de ambientes internos, considerando diferentes estratégias de DCV.

Os ensaios de validação têm como objetivo principal avaliar o desempenho da solução em diferentes cenários de controle. Para isso, os procedimentos de ensaio foram planejados considerando diferentes estratégias de controle de ventilação por demanda:

- a) sem controle;
- b) controle *on/off*;
- c) controle proporcional.

Os ensaios foram conduzidos na Sala 5 do Campus São José do IFSC, abrangendo desde a configuração inicial dos parâmetros do sistema até a coleta e análise de dados relevantes, conforme detalhado no Apêndice B. Os conhecimentos obtidos a partir desses procedimentos desempenharam um papel fundamental na validação da eficácia da solução proposta, permitindo uma avaliação de sua capacidade em promover ambientes internos saudáveis.

Para o cálculo da vazão de ar externo, os dados dos primeiros 20 min do ensaio foram desconsiderados, pois, nesse período, a elevada oscilação das variáveis medidas violava as hipóteses simplificativas do modelo, o que levaria a resultados incoerentes.

4.1.1 Ensaio 1: sem controle

O primeiro ensaio, intitulado "sem ventilação", consistiu na desativação do sistema de ventilação, permitindo o acúmulo de CO_2 . Este experimento serviu como referência para avaliar a qualidade do ar na ausência de sistemas controlados. Iniciado às 19h42 e encerrado às 20h32, o ensaio teve uma duração total de 50 minutos. A taxa de dispersão de CO_2 no ambiente, registrada pelo medidor, foi aproximadamente 5,9 litros por minuto.

Ao longo do experimento, a concentração atmosférica média de CO_2 foi de 415 ppm, refletindo a concentração natural fora da sala. Os resultados ilustrados na Figura 30, revelaram um aumento constante na concentração de CO_2 , partindo de 430 ppm e ultrapassando 1400 ppm em menos de 50 minutos.



Figura 30 – Concentração de CO_2 no cenário sem controle

Fonte: elaborada pelo autor



Figura 31 – Temperaturas no cenário sem controle

Fonte: elaborada pelo autor

A temperatura inicial na sala foi de 25,4 °C, estabilizando-se em cerca de 27 °C. Simultaneamente, a umidade relativa oscilou de 73% para 67%, conforme indicado nas Figuras 31 e 32.

As medições de $PM_{2,5}$ variaram principalmente entre 120 $\mu g/m^3$ a 147 $\mu g/m^3$, atingindo um pico de 157 $\mu g/m^3$, conforme mostrado na Figura 33. Esse ponto máximo



Figura 32 – UR no cenário sem controle

Fonte: elaborada pelo autor

ocorreu por volta dos 20 minutos do ensaio, coincidindo com a abertura da porta para verificar a dispersão de CO_2 .



Figura 33 – Níveis de materiais particulados no cenário sem controle

Fonte: elaborada pelo autor

A vazão de ar externo calculada (Figura 34) apresentou uma média de aproximadamente 256 m^3/h , considerando o intervalo de tempo entre 20 e 50 minutos deste ensaio. Como o ventilador esteve desligado, a vazão observada atribui-se exclusivamente à infiltração do ar pelas frestas de portas e janelas, e pela pequena abertura que foi mantida em uma das seções de janela (Apêndice B). Desse modo, foi possível constatar que, embora a sala de aula onde foi realizado o ensaio possuísse ventilação natural razoável, ela não foi suficiente para manter a concentração de CO_2 dentro dos limites aceitáveis. Além disso, pôde-se observar que, durante a execução do ensaio, havia vento natural de alguma intensidade, podendo-se atribuir a este fator o valor de vazão natural relativamente elevado.



Figura 34 – Cálculo da vazão de ar externo no cenário sem controle

Fonte: elaborada pelo autor

Devido à falta de ventilação controlada, o nível e o consumo de energia permaneceram constantemente em zero.

4.1.2 Ensaio 2: controle *on/off*

No segundo ensaio, intitulado "controle On/Off", adotou-se a estratégia de ativar o sistema de ventilação no nível máximo sempre que a leitura do nível de CO_2 ultrapassasse 1000 ppm. De maneira correspondente, o sistema de ventilação retornava ao nível zero quando a leitura ficava abaixo de 1000 ppm, estabelecendo um ciclo de ligar e desligar com o objetivo de manter estabilidade em torno de 1000 ppm. O ensaio foi iniciado às 20h52 e encerrou-se às 21h42, totalizando 50 minutos. Ao longo da experimentação, a taxa de dispersão de CO_2 no ambiente, conforme registrado pelo medidor, foi aproximadamente de 5,9 litros por minuto.

Durante o experimento, foi realizado um monitoramento contínuo da concentração atmosférica de CO_2 , revelando uma média de 412 ppm. Notou-se um aumento constante na concentração de dióxido de carbono, culminando em uma marca de aproximadamente 1000 ppm. Após esse ponto, as leituras estabilizaram em torno de 1000 ppm, conforme ilustrado na Figura 35. Inicialmente registradas em 431 ppm, as leituras atingiram 1016 ppm após 50 minutos de ensaio. Ao longo da maior parte do teste, as medições flutuaram próximas a 1000 ppm, sem ultrapassar os 1043 ppm.



Figura 35 – Concentração de CO_2 no cenário com controle on/off

Fonte: elaborada pelo autor

A temperatura inicial na sala foi de 24,9 °C, e ao longo do período de observação, ela estabilizou-se em cerca de 26,5 ºC (Figura 36). A umidade relativa do ar apresentou variação de 73% para 67% (Figura 37).



Figura 36 – Temperaturas no cenário om controle on/off

Fonte: elaborado pelo autor

As medições de PM_{2,5} permaneceram predominantemente na faixa de 144 $\mu g/m^3$ a 171 $\mu q/m^3$, conforme demostrado na Figura 38.

O controle de ventilação atuou ligando no nível 70, sempre que a concentração superava a marca de 1000 ppm, e desligando quando alcançava medida inferior a essa (Figura 39).



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 38 – Níveis de materiais particulados no cenário om controle on/off



Fonte: elaborado pelo autor

A vazão de ar externo calculada (veja Figura 40) apresentou uma média de aproximadamente 457 m^3/h , considerando o intervalo de tempo entre 20 e 50 minutos deste ensaio. Este processo resultou em um consumo acumulado calculado de 0,049 kWh.



Figura 39 – Níveis do exaustor no cenário com controle on/off

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 40 – Cálculo da vazão de ar externo no cenário com controle $\mathit{on/off}$



Fonte: elaborado pelo autor

4.1.3 Ensaio 3: controle proporcional

O terceiro ensaio, denominado "controle proporcional", utilizou a estratégia correspondente para manter a variável controlada, a concentração de CO_2 , próxima ao valor desejado. O experimento teve início às 18h38 e foi concluído às 19h28, totalizando 50 minutos, período em que a taxa de dispersão de CO_2 no ambiente manteve-se em torno de 5,9 litros por minuto, conforme registrado pelo medidor.

O monitoramento constante da concentração atmosférica de CO_2 revelou uma média de 418 ppm. Ao longo do ensaio, observou-se um aumento progressivo nas leituras de CO_2 , atingindo aproximadamente 900 ppm. Após esse ponto, as leituras procuraram estabilizarse, mantendo-se em torno de 950 ppm e flutuando nessa faixa, conforme representado na Figura 41.



Figura 41 – Concentração de CO_2 no cenário com controle proporcional

Fonte: elaborada pelo autor

A temperatura inicial da sala foi de 26 °C, estabilizando-se em aproximadamente 27,5 °C durante o período de observação (Figura 42). A umidade relativa do ar variou de 72,1% para 66,2% (Figura 43).

As medições de $PM_{2,5}$ mantiveram-se predominantemente na faixa de 121 $\mu g/m^3$ a 257 $\mu g/m^3$, conforme ilustrado na Figura 44.

O controle de ventilação foi acionado conforme as diretrizes estabelecidas na Tabela 1, iniciando sua operação quando a concentração de CO_2 ultrapassou 800 ppm, mantendo-se predominantemente abaixo do limiar de 60, como demonstrado na Figura 46.

A vazão de ar externo calculada (veja Figura 45) apresentou uma média de aproximadamente 590 m^3/h , considerando o intervalo de tempo entre 20 e 50 minutos do ensaio, que resultou em um consumo acumulado calculado de 0,069 kWh.



Figura 42 – Temperaturas no cenário com controle proporcional

Fonte: elaborada pelo autor



Figura 43 – UR no cenário com controle proporcional

Fonte: elaborada pelo autor



Figura 44 – Níveis de materiais particulados no cenário com controle proporcional

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 45 – Cálculo da vazão de ar externo no cenário com controle proporcional



Fonte: elaborada pelo autor



Figura 46 – Leituras dos níveis do exaustor no cenário com controle proporcional

Fonte: elaborada pelo autor

4.2 Comparativo dos resultados

A análise a seguir destaca os resultados obtidos por diversas estratégias de *Demand Control Ventilation* (DCV) e seu impacto na melhoria da qualidade do ar interno. Cada ensaio foi conduzido com o objetivo de avaliar essas abordagens, e os dados coletados são apresentados neste estudo comparativo.

4.2.1 Leituras da concentração de CO₂

A Figura 47 apresenta uma análise comparativa dos resultados obtidos na medição da concentração de dióxido de carbono em três ensaios de validação do sistema.



Figura 47 – Comparativo das leituras da concentração de CO_2

Fonte: elaborada pelo autor

No primeiro experimento, que não incorporou controle de ventilação externa, notouse uma elevação significativa nos níveis de CO_2 . Iniciando em 430 ppm, a concentração ultrapassou 1400 ppm, indicando crescimento constante ao longo do ensaio, e evidenciada a falta de controle, o que permitiu um aumento constante nos níveis de CO_2 , que superaram os limites recomendados mencionados no Quadro 1.

No segundo ensaio, com a implementação do controle on/off, as leituras iniciaram em 431 ppm, atingindo 1016 ppm. Até 1000 ppm, observou-se um crescimento constante, alinhado à tendência do primeiro ensaio. Posteriormente, as medições estabilizaram-se em torno de 1000 ppm, sem ultrapassar os 1043 ppm, indicando algum controle sobre a concentração de CO_2 , embora com variações dentro da faixa aceitável.
No terceiro ensaio, com a implementação do controle proporcional, as leituras iniciaram em 422 ppm, alcançando 955 ppm. Até 863 ppm, registrou-se crescimento constante, em conformidade com as curvas dos ensaios anteriores. Contudo, as medições mantiveram-se em torno de 950 ppm após esse ponto, indicando efetividade no controle da concentração de CO_2 . Esse resultado sugere que a estratégia de controle proporcional demonstrou maior eficácia em manter os níveis de CO_2 dentro dos padrões recomendados pela ANVISA em comparação com os outros ensaios.

4.2.2 Leituras de temperaturas

Os ensaios também foram conduzidos para analisar as variações de temperatura no ambiente controlado, uma vez que a temperatura desempenha um papel crucial na determinação qualidade do ar interno (QAI). Os resultados comparativos das leituras de temperatura, obtidas em três ensaios distintos, estão apresentados de forma gráfica na Figura 48.



Figura 48 – Comparativo das leituras de temperaturas

Fonte: elaborada pelo autor

No Ensaio 1, a temperatura inicial foi registrada em 25,4 °C, aumentando para 27 °C ao longo do ensaio, que teve início às 19:42 e encerramento às 20:32. Já no Ensaio 2, iniciando a 24,9 °C, a temperatura atingiu 26,5 °C ao término do ensaio, que se deu entre 20:52 e 21:42. No Ensaio 3, a temperatura inicial foi de 26 °C, elevando-se para 27,5 °C durante o ensaio, realizado das 18:38 às 19:28.

Em todos os cenários, a variação de temperatura foi aproximadamente de 1,6 °C, evidenciando que o isolamento do ambiente de ensaio e a restrição da circulação livre

de ar propiciam uma tendência de elevação de temperatura no ambiente. A disparidade observada no Ensaio 2, se deve ao fato deste teste ter sido conduzido em horário posterior aos demais, quando a temperatura atmosférica já era mais baixa.

4.2.3 Leituras de umidade relativa do ar (UR)

Ao analisar as flutuações da umidade relativa do ar, observa-se uma tendência de decréscimo em todos os cenários, conforme ilustrado na Figura 49. Essa redução ocorre devido à relação direta entre a umidade relativa e a temperatura, sendo influenciada pela variação do ponto de saturação. A elevação da temperatura geralmente resulta na diminuição da umidade relativa devido ao correspondente aumento no ponto de saturação (MENDONÇA, 2005).



Figura 49 – Comparativo das leituras de UR

Fonte: elaborada pelo autor

No Ensaio 1 e 2, a UR inicial foi de 73%, reduzindo para 67% ao longo do ensaio. No Ensaio 3, iniciando em 72,1%, a UR alcançou 66,2%. Todas as medições realizadas mantiveram-se dentro da margem de incerteza estipulada em \pm 3% UR (SENSIRION, 2020), conforme recomendado pela ANVISA (2003).

4.2.4 Concentração de PM_{2,5}

As medições das concentrações de $PM_{2,5}$ indicam consistentemente valores superiores aos limites recomendados pela ANVISA, que estabelece um valor aceitável de aerodispersóides totais no ar inferior a $\mu g/m^3$, como ilustrado na Figura 50.



Figura 50 – Comparativo dos níveis de concentração de PM_{2.5}

Fonte: elaborada pelo autor

É importante ressaltar que as leituras obtidas podem apresentar distorções devido à falta de calibração do sensor. Portanto, é essencial realizar ensaios adicionais de validação, com ênfase especial nesse parâmetro, e utilizar equipamentos adequados para confirmar a precisão das medições efetuadas por este sensor.

No contexto do teste com controle proporcional, que foi o primeiro a ser conduzido, observaram-se variações expressivas ao longo do ensaio. A primeira ocorrência significativa surgiu após um aumento no nível de controle, possivelmente resultando na dispersão de poeira acumulada sobre o exaustor para o interior do ambiente de teste. Essa observação ressalta a sensibilidade do sistema, e evidencia a necessidade de condições controladas para assegurar a integridade dos resultados obtidos.

4.2.5 Níveis de controle do exaustor

Na Figura 51, é apresentada uma análise comparativa dos níveis de controle do exaustor, demonstrando o funcionamento da automação do sistema.

No cenário sem controle, o nível permanece constantemente em zero, como esperado. Já na possibilidade on/off, o exaustor entra em operação após 25 minutos, atingindo a concentração de 1000 ppm. Quando a concentração diminui abaixo desse valor, o motor é desligado. Destaca-se a estabilidade e eficácia na manutenção do CO_2 na faixa de 1000 ppm, entretanto, é relevante mencionar que esse modelo impõe maior estresse ao motor devido aos sete acionamentos em um intervalo de 50 minutos.

Quando se trata do controle proporcional, a atuação do exaustor torna-se evidente



Figura 51 – Comparativo dos níveis de controle do exaustor

Fonte: elaborada pelo autor

aos 17 minutos de ensaio, controlando a curva de crescimento da concentração de CO_2 , conforme ilustrado na Figura 47. Entre os minutos 25 e 50 do ensaio, mesmo diante de algumas flutuações, observa-se estabilidade e eficácia nesse modelo de DCV. Este permanece predominantemente no nível 54, com variações suaves, proporcionando melhores condições para o funcionamento do motor e contribuindo para um maior conforto sonoro.

4.2.6 Cálculos da vazão de ar externo

A análise comparativa do cálculo da vazão de ar externo (Figura 52) proporciona *insights* sobre os três cenários estudados.

No primeiro cenário, sem controle, mesmo na ausência de ventilação externa, observou-se uma vazão de ar externo média de aproximadamente 256 m^3/h . Isso sugere que as frestas no ambiente são responsáveis por uma certa vazão, embora insuficiente, ainda considerável.

No segundo ensaio, com comando on/off, a vazão de ar externo media foi superior à do ambiente sem contenção. A vazão de ar externo média foi de aproximadamente 457 m^3/h , porém inferior à do ensaio com controle proporcional, que apresentou uma média de 590 m^3/h .

Essa diferença decorre do comportamento dos modelos de controle. No dispositivo on/off, o motor está ou ligado ou desligado, o que contribui para uma média inferior de vazão, enquanto no controle proporcional o motor ajusta-se a um nível de retenção e mantém-se operacional por mais tempo, resultando em uma vazão média mais elevada.



Figura 52 – Comparativo da vazão de ar externo calculada

Fonte: elaborada pelo autor

4.2.7 Consumo de energia

O consumo de energia nos ensaios foi determinado mediante a aplicação da equação Equação 4.1. Nessa equação, a potência foi obtida da relação entre o nível do controlador e a potência, estabelecida durante os ensaios de caracterização do exaustor (seção A). A referida potência foi então multiplicada pelo tempo de ativação do exaustor em cada intervalo de operação e, subsequentemente, dividida por 1000.

$$\sum_{0}^{50} \left(\frac{Pot \hat{e}ncia \ [W] \ . \ Tempo \ em \ horas}{1000} \right) \tag{4.1}$$

A Figura 53 ilustra a comparação do consumo de energia acumulado ao longo de cada ensaio.

O ensaio que implementou o controle proporcional resultou em um consumo acumulado calculado de 0,069 kWh, enquanto o ensaio que adotou o controle on/off registrou um consumo de 0,049 kWh.

A diferença de consumo pode ser justificada se comparada ao percentual de tempo em que a sala foi mantida "dentro do alvo", ou seja, com a concentração de CO_2 abaixo de 1.000 ppm.

No ensaio com controle on-off, a concentração de CO_2 esteve dentro do alvo em apenas 64,9% do tempo, enquanto, no ensaio com controle proporcional, a concentração esteve 100% do tempo dentro do alvo. Para efeito de comparação, no ensaio sem controle,



Figura 53 – Comparativo do consumo de energia

Fonte: elaborada pelo autor

o tempo no alvo foi de 48,4%.

Desta forma, observa-se que o modo de controle on-off, apesar de estabilizar a concentração de CO_2 em torno do valor alvo, acaba permitindo que este alvo seja ultrapassado em significativa parte do tempo total, enquanto o modo de controle proporcional, ao iniciar a atuação do sistema a partir de 800 ppm, é capaz de garantir que o ambiente esteja dentro do limite estabelecido por norma durante todo o tempo do ensaio, evidenciando a eficácia do sistema, e explicando o maior gasto de energia total.

4.3 Teste em sala de aula ocupada

O protótipo foi testado na Sala 05 do Campus São José do IFSC, onde estiveram presentes 28 pessoas ao longo da aplicação prática. O modelo de DCV escolhido para esse teste foi o controle proporcional. Ao longo dos 90 minutos de teste, a média da concentração atmosférica de CO_2 foi de 422,5 ppm. Durante esse período, estima-se que a geração de CO_2 tenha sido de 9,5496 litros por minuto, conforme indicado no Apêndice E.

Durante o ensaio, observou-se um aumento gradual nas medições de dióxido de carbono, atingindo 1339 ppm aos 28 minutos do teste (conforme ilustrado na Figura 54). A estabilidade nos níveis de dióxido de carbono foi alcançada em torno de 1340 ppm, um patamar superior aos 1000 ppm recomendados pela ANVISA (2003). É relevante destacar que, apesar do protótipo ter sido concebido para um ambiente com 17 pessoas e o teste ter sido realizado com 28, as leituras indicam uma tendência à estabilidade, destacando a eficácia do sistema em manter baixos níveis de dióxido de carbono.



Fonte: elaborada pelo autor

Ao contrário do comportamento observado durante os testes de validação mencionados na subseção 4.2.2, as leituras de temperatura revelaram uma curva distinta ao longo do período de análise. Inicialmente, ao ligar o aparelho de ar condicionado a 23 °C e com a entrada dos alunos na sala, as leituras decresceram de 25,3 °C para 23,8 °C (aos 7 minutos). Posteriormente, à medida que o ambiente alcançava uma homogeneização térmica e as atividades dinâmicas na sala de aula se desenrolavam, incluindo a movimentação dos alunos, a temperatura aumentou, atingindo 26,2 °C (aos 34 minutos). Em seguida, com o cessar da movimentação na sala de aula, as temperaturas declinaram, estabilizando-se em torno de 25,5 °C, conforme evidenciado na Figura 55.

A umidade relativa do ar começou em 64,3%, estabilizando, posteriormente em torno de 50,7%. Essa queda, ilustrada na Figura 56, é mais acentuada em comparação com os resultados dos testes de validação. Isso pode ser atribuído ao funcionamento do aparelho de ar condicionado, em que o processo de troca de calor gera um ar mais frio e seco.

As medições de $PM_{2,5}$ permaneceram predominantemente na faixa de 162 $\mu g/m^3 3$ a 99 $\mu g/m^3$, conforme evidenciado na Figura 57. É importante notar que as leituras obtidas podem apresentar distorções devido à falta de calibração do sensor, resultando em valores ligeiramente elevados. Além disso, observa-se a ocorrência de picos de material particulado nos momentos em que o exaustor é acionado e varia suas velocidades. Este padrão sugere que tais picos podem ser atribuídos à dispersão de poeira acumulada sobre o exaustor para o interior do ambiente de teste.

Na Figura 58, é possível observar os diferentes níveis de controle do exaustor durante



Fonte: elaborado pelo autor



Fonte: elaborado pelo autor

o teste. Com uma ocupação de 28 pessoas na sala, superando a capacidade projetada de 17, a elevação da concentração de CO_2 ocorreu de maneira mais rápida devido à taxa de geração mais elevada. Esse aumento na concentração resultou em uma ativação mais ágil do exaustor, que atingiu o nível 70 em apenas 11 minutos de teste, permanecendo nesse patamar até o término do experimento. Esse comportamento refletiu uma notável estabilidade na concentração de dióxido de carbono.



Figura57– Leituras dos níveis de materiais particulados





Figura 58 – Leituras dos níveis do exaustor

Fonte: elaborado pelo autor

A vazão de ar externo (Figura 59) apresentou uma média de aproximadamente 584 m^3/h , considerando o intervalo de tempo entre 20 e 90 minutos deste ensaio.

Este ensaio resultou em um consumo acumulado calculado de 0,1996 kWh.

Os resultados evidenciaram que o sistema operou conforme o planejado. No entanto, foi observado que não conseguiu manter o nível de concentração de CO2 dentro do limite desejado, devido às restrições de capacidade do sistema de ventilação.



Fonte: elaborado pelo autor

5 CONCLUSÕES

O protótipo desenvolvido abrange um sistema de aquisição de dados essenciais para avaliar a qualidade do ar. Este sistema coleta informações sobre a concentração de particulados, os níveis de CO_2 , temperatura e umidade do ar. Destaca-se a necessidade de calibrar o sensor responsável pela medição de material particulado, devido à inconsistência observada nos dados coletados. Embora esta questão não afete diretamente a automação do sistema, é um ponto a ser melhorado.

Durante a fase de implementação da automação, o desafio foi a linearização da curva de atuação do exaustor, exigindo estudos complementares para diagnosticar o fenômeno encontrado e implementar os indutores que atuaram como filtros, contribuindo para a estabilização da resposta do equipamento.

Os testes conduzidos em laboratório, visando a aferição e validação dos dados experimentais coletados pelo sistema desenvolvido, bem como a avaliação da atuação do controlador em relação à concentração de CO_2 , confirmaram a eficácia do sistema. Destaca-se a efetividade da automação na manutenção e controle dos níveis de dióxido de carbono, otimizando as condições ambientais.

Foi observado que, quando o motor do exaustor operava no máximo (70), a vazão máxima de diluição ficava consideravelmente abaixo da prometida pelo fabricante, que é de 925 m^3/h . Isso pode ser atribuído às perdas no duto.

Embora em situações ligeiramente diferentes, o controle proporcional demonstrou superioridade em relação ao controle on/off. No cenário de controle proporcional, devido a uma vazão de ar externo superior, os níveis de CO_2 permaneceram mais baixos.

A aplicação prática do sistema em um ambiente real, usando o controle proporcional, permitiu validar o projeto em condições de uso cotidianas, consolidando sua aplicabilidade e ressaltando sua relevância para a promoção da saúde e bem-estar em ambientes fechados. Além disso, implementou-se com sucesso uma interface gráfica de acompanhamento remoto, que possibilita, por meio de uma interface *web*, o monitoramento das medições da sala mesmo à distância.

Em resumo, este trabalho acadêmico alcançou os objetivos propostos e ofereceu uma solução tangível para a melhoria das condições ambientais em locais fechados. A identificação da necessidade de calibração do sensor de concentração de material particulado destaca-se como um ponto de melhoria, não impactando diretamente na automação, mas indicando a importância contínua do refinamento técnico. A implementação bem-sucedida do sistema de monitoramento e controle reforça seu potencial como uma ferramenta valiosa para a gestão eficaz da qualidade do ar em espaços internos, com implicações positivas para a saúde e o conforto dos ocupantes.

5.1 Trabalhos futuros

À luz das contribuições e aprendizados derivados deste estudo, uma série de oportunidades para investigações futuras emerge, visando aprimorar e expandir a abordagem proposta. Algumas sugestões para trabalhos futuros incluem:

- Explorar a melhoria contínua dos algoritmos de controle, buscando uma otimização mais eficaz das condições ambientais. A implementação de técnicas avançadas de aprendizado de máquina pode propiciar uma adaptação dinâmica do sistema diante das variáveis do ambiente interno. Sugere-se, também, a expansão do DCV para abranger uma variedade mais ampla de parâmetros, não limitada ao CO₂.
- Aprofundar a pesquisa na inclusão de sensores mais avançados e precisos, ampliando a capacidade de monitoramento para além dos poluentes atmosféricos convencionais, como os compostos orgânicos voláteis (COVs). Essa abordagem proporcionaria uma visão mais abrangente da qualidade do ar, permitindo uma resposta mais completa do sistema de controle.
- Aprimorar a eficiência da disponibilização de dados no protótipo, considerando o armazenamento local das informações em memória interna. Isso pode otimizar a capacidade de resposta do sistema e facilitar a análise posterior das informações coletadas.
- Desenvolvimento de um *firmware* específico para o *hardware* utilizado, visando otimizar o código. A abordagem adotada utiliza os códigos fornecidos pelos fabricantes, com a leitura sendo feita de forma sequencial. Uma outra abordagem é ligar os diversos sensores em paralelo e, após o tempo previsto de atraso, efetuar as leituras, otimizando o tempo total.
- Investigar estratégias adicionais para melhorar a eficiência energética do sistema, considerando o consumo do exaustor e de outros dispositivos envolvidos. Isso pode incluir a análise de fontes de energia alternativas e métodos para reduzir o consumo durante períodos de baixa demanda.

Essas sugestões de trabalhos futuros têm o propósito de estender e enriquecer a linha de raciocínio estabelecida neste trabalho, contribuindo para o avanço contínuo na gestão da qualidade do ar em ambientes internos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA - ANVISA. Resolução nº 09, de 16 de janeiro de 2003. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasillia, DF, 20 jan. 2003. 17, 19, 20, 38, 73, 77

ALBERTAZZI Jr., A.; SOUZA, A. R. Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial. [S.l.]: Manole, 2008. 116, 119

ALBUQUERQUE, Y. *ESP32 pinout - Guia Básico de GPIOs*. Blog Smart Kits, 2020. Disponível em: https://blog.smartkits.com.br/esp32-pinout-guia-basico-de-gpios/. Acesso em: 10 fev. 2023. 25

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *Fundamentals Handbook*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, 2013. 105, 114

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHARAE. ASHRAE Standard 62.1: Ventilation for acceptable indoor air quality. Atlanta, 2019. 17

AMPHENOL. Telaire T6615 CO2 sensor dual channel module. 2014. Disponível em: https://www.amphenol-sensors.com/hubfs/Documents/ AAS-920-474D-Telaire-T6615-Sensor-031814-web.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2022. 33, 34

ARCHITECTURAL ENERGY CORPORATION. Design brief - demanddcontrolled ventilation. *Energy Design Resources*, 2007. Disponível em: https://www.15000inc.com/wp/wp-content/uploads/Demand-Control-Ventilation.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2023. 20

ARDUINO.CC. Arduino® UNO R3. 2022. Disponível em: https://docs.arduino.cc/ resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2022. 25, 43, 44

ASAIR. AHT10 Integrated temperature and humidity sensor. 2020. Disponível em: http://www.aosong.com/en/products-40.html. Acesso em: 21 jul. 2022. 35, 37

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO - ABRAVA. *Cartilha qualidade do ar interno*. São Paulo, 2021. Disponível em: https://abrava.com.br/normalizacoes/cartilha-q-a-i/. Acesso em: 21 set. 2022. 19

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. ABNT NBR 16401-3:2008. Instalações de ar-condicionado – sistemas centrais e unitários. Parte 3: qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008. 114

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. 21, 22

BALL, S. Embedded microprocessor systems: real world design. [S.I.]: Elsevier, 2002. 22

BANERJI, S.; CHOWDHURY, R. On ieee 802.11: Wireless lan technology. *International Journal of Mobile Network Communications Telematics*, v. 3, 07 2013. 23

BAÑOS-GONZALEZ, V. et al. Ieee 802.11 ah: A technology to face the iot challenge. *Sensors*, MDPI, v. 16, n. 11, p. 1960, 2016. 23

BERTOLDI, T. D. Q. Tabela de peso e altura por idade (crianças e adultos). 2021. Revisão técnica: equipe médica da Unimed do Brasil. Disponível em: <http://www.unimed.coop.br/viver-bem/pais-e-filhos/estatura-por-idade>. Acesso em: 20 out. 2023. 114

BLANCHON, B. A simple and efficient JSON library for embedded C++. 2023. Disponível em: ">https://github.com/bblanchon/ArduinoJson>. Acesso em: 28 may. 2023. 48

BOLTON, W. Instrumentação & Controle. [S.l.]: Hemus, 2002. ISBN 852890119X. 28

BRASFAIBER. *Exaustor com damper sob pressão: como funciona?* 2023. Disponível em: https://www.brasfaiber.com.br/exaustor-com-damper-sob-pressao-como-funciona/. Acesso em: 17 fev. 2023. 42

BRITO, G. d. S.; SODRÉ, F.; ALMEIDA, F. O impacto do material particulado na qualidade do ar. *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 05, p. 1335–1354, 2018. 37

CURTO CIRCUITO. *NodeMCU V3 - ESP8266 - CH340.* 2024. Disponível em: <https: //curtocircuito.com.br/nodemcu-v3-esp8266-esp-12e-ch340.html?utm_term=&utm_ campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=7016354091&hsa_ cam=15498131912&hsa_grp=129415049974&hsa_ad=567519003547&hsa_src=g&hsa_ tgt=pla-471805080652&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_ source=1&gclid=CjwKCAiArLyuBhA7EiwA-qo80CmPfRTQ7Im1r7AyGcTeX2X9Ce_ IRUzRKOmIaFaubi7aR8KncF7O9xoCFvEQAvD_BwE>. Acesso em: 15 fev. 2024. 120

CURTO CIRCUITO. *Placa DOIT ESP32 - ESP32-WROOM-32D - WiFi / Bluetooth.* 2024. Disponível em: https://curtocircuito.com.br/ placa-doit-esp32-esp32-wroom-32d-wifi-bluetooth.html>. Acesso em: 15 fev. 2024. 121

DUBOIS, D.; DUBOIS, E. A formula to estimate approximate surface area, if height and weight are known. v. 17, p. 863–871, 1916. 113

EDINBURG SENSORS. NDIR Sensor for Non-Dispersive Infrared Detection. 2022. Disponível em: https://edinburghsensors.com/non-dispersive-infrared-sensing-technology/. Acesso em: 22 dez. 2022. 29

ELECTRONICS, S. Library for the Sensirion SCD30 CO2 Sensor. 2022. Disponível em: ">https://github.com/sparkfun/Sparkfun/

ELETROGATE COMPONENTES ELETRôNICOS. Sensor de Umidade e Temperatura DHT11. 2024. Disponível em: https://www.eletrogate.com/sensor-de-umidade-e-temperatura-dht11>. Acesso em: 15 fev. 2024. 121

ELETROGATE COMPONENTES ELETRôNICOS. Uno R3 + Cabo Usb para Arduino. 2024. Disponível em: https://www.eletrogate.com/uno-r3-cabo-usb-para-arduino. Acesso em: 15 fev. 2024. 121

ELETRÔNICA, M. *Biblioteca para o dimmer DM02A*. 2019. Disponível em: https://github.com/MSS-ELETRONICA/DM02A>. Acesso em: 28 mai. 2023. 48

ESPRESSIF. Datasheet: ESP32 Series. 2022. Disponível em: <https://www.espressif. com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2022. 43, 44

ESPRESSIF. *ESP8266EX Datasheet*. 2022. Disponível em: <https://espressif.com/sites/ default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2022. 25, 31, 43, 44, 45

FANGER, P. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. [S.l.]: Robert E. Krieger, 1982. 114

FOROUZAN, B. A. Comunicação de Dados e Redes de Computadores. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2007. ISBN 8586804886. 25, 26, 27

Global Monitoring Laboratory. *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. 2023. Disponível em: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html. Acesso em: 20 out. 2023. 114

GOKHALE, P.; BHAT, O.; BHAT, S. Introduction to iot. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, v. 5, n. 1, p. 41–44, 2018. 21

HONEYWELL. *HPM Series: Particulate Matter Sensors.* 2021. Disponível em: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/ siot/en-us/products/sensors/particulate-matter-sensors-hpm-series/documents/ sps-siot-particulate-hpm-series-datasheet-32322550-ciid-165855.pdf>. 38, 39

IBM, I. B. M. *Protocolo MQTT*. 2021. Disponível em: <https://www.ibm.com/docs/pt-br/ibm-mq/7.5?topic=ssfksj-7-5-0-com-ibm-mq-pro-doc-q002870--htm>. Acesso em: 27 junho 2022. 52, 53

IEEE 802.11 WORKING GROUP. IEEE standard for information technology -telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks-specific requirements - part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. *IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016)*, 2021. 23

INFLUXDATA. Introducing InfluxDB 3.0. 2023. Disponível em: https://www.influxdata.com/products/influxdb-overview/. Acesso em: 20 junho. 2023. 56

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008-2009 - Antropometria e Estado Nutricional de Crianças, Adolescentes e Adultos no Brasil. [S.l.], 2010. Disponível em: <https://www.fsp.usp.br/lcsoabcpaulista/wp-content/uploads/2021/08/liv45419.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023. 114

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. VIM 2012. Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. Duque de Caxias, 2012. 116

KUROSE, J.; ROSS, K. Redes de Computadores ea Internet: Uma Abordagem Topdown. 6^a Edição. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2013. 21 LACERDA, F.; LIMA-MARQUES, M. Da necessidade de princípios de arquitetura da informação para a internet das coisas. *Perspectivas em Ciência da Informação*, SciELO Brasil, v. 20, p. 158–171, 2015. 21

LIPINSKI, T. et al. Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings. *International Journal of Thermofluids*, novembro 2020. 17

LOURENÇO, C. C. Qualidade de energia: Influência de harmônicos em motores elétricos. INSTITUTO ENSINAR BRASIL FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE, 2019. Disponível em: https://dspace.doctum.edu.br/handle/123456789/2053. Acesso em: 12 jan. 2021. 94

MENDONÇA, L. V. Condensações em edificios. Arquitectura & Vida, v. 63, p. 71–74, 2005. 73

METELSKIY, K. Demand controlled ventilation systems: Co2 controlled ventilation systems. Mikkelin Ammattikorkeakoulu, 2011. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/38043008.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2023. 20

MICROCHIP. AVR® Microcontroller with Core Independent Peripherals and picoPower® Technology. 2018. Disponível em: https://onlinedocs.microchip.com/pr/GUID-0EC909F9-8FB7-46B2-BF4B-05290662B5C3-en-US-12.1.1/index.html. Acesso em: 28 mar. 2023. 28

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 3. ed. New York: John Wiley, 2003. 112

MOUSER ELETRONICS. *Honeywell HPMA115C0-004*. 2024. Disponível em: https://br.mouser.com/ProductDetail/785-HPMA115C0-004. Acesso em: 15 fev. 2024. 120

MOUSER ELETRONICS. *Sensirion SCD30*. 2024. Disponível em: https://br.mouser.com/ProductDetail/403-SCD30. Acesso em: 15 fev. 2024. 120

MOUSER ELETRONICS. *T6615-10K*. 2024. Disponível em: <https://br.mouser.com/ ProductDetail/527-T6615-10K>. Acesso em: 15 fev. 2024. 121

MQTT. MQTT: The Standard for IoT Messaging. 2022. Disponível em: . Acesso em: 01 out. 2022">https://mqtt.org/>. Acesso em: 01 out. 2022. 52, 53

MSS ELETRÔNICA. *Módulo dimmer 2 canais bivolt - DM02A*. 2020. Disponível em: https://www.msseletronica.com.br/arquivos/DM02A.pdf>. Acesso em: 01 out. 2022. 40, 41, 92

MSS ELETRONICA. *Módulo dimmer 2 canais bivolt para Arduino ESP8266 ESP32 STM* - *DM02A*. 2024. Disponível em: https://www.msseletronica.com.br/detalhes/mA%EF%BF%BDdulo-dimmer-2-canais-bivolt-para-arduino-esp8266-esp32-stm-dm02a_pid1349. html>. Acesso em: 15 fev. 2024. 120

MULTIVAC. Ventilador centrífugo em linha. 2017. Disponível em: https://www.multivac.com.br/wa_files/B-05_20MULTIVAC_20-_20VENTILADOR_20AXC.pdf>. Acesso em: 23 set. 2022. 42, 98

MULTIVAC. AXC 250 A - 220V - EXAUSTOR CENTRÍFUGO. 2024. Disponível em: https://loja.multivac.com.br/axc-250-a-220v-exaustor-centrifugo. Acesso em: 15 fev. 2024. 120

NAQVI, S. N. Z.; YFANTIDOU, S. *Time Series Databases and InfluxDB*. 2018. Disponível em: https://cs.ulb.ac.be/public/_media/teaching/influxdb_2017.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2022. 56

O'LEARY, N. A client library for MQTT messaging. 2020. Disponível em: <https://www.arduinolibraries.info/libraries/pub-sub-client>. Acesso em: 28 may. 2023. 48

OLIVEIRA, A. S. de; ANDRADE, F. S. de. Sistemas Embarcados. Hardware e Firmware na Prática. [S.l.]: Érica, 2010. ISBN 8536501057. 23

OLIVEIRA, S. de. Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi. [S.1.]: Novatec Editora, 2021. ISBN 9786586057353. 23, 24, 25, 27, 30, 31

OPENJS. Node-RED: Low-code programming for event-driven applications. 2022. Disponível em: https://nodered.org/>. Acesso em: 21 jul. 2022. 53

OSEPP. DHT 11 Humidity Temperature Sensor. 2022. Disponível em: https://www.osepp.com/electronic-modules/sensor-modules/63-humidity-temperature-sensor. Acesso em: 21 jul. 2022. 35, 37

PEACEFAIR ELETRINIC. Peacefair PZEM-004T 220V TTL Modbus AC Voltmeter Ammeter Smart Electric Watt Meter. 2024. Disponível em: http://en.peacefair.cn/products/608.html. Acesso em: 10 jan. 2024. 108, 109

PERSILY, A.; JONGE, L. de. Carbon dioxide generation rates for building occupants. n. 00, p. 1–11, 2017. 113, 114

PIRES, P. F. et al. Plataformas para a internet das coisas. *Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2015. 53

RANGELOV, D. Arduino Library for Honeywell's Particle Sensor. 2020. Disponível em: https://github.com/mitkor2/HPMA115C0. Acesso em: 28 may. 2023. 48

RAVINDRA KUMAR JHA. Non-dispersive infrared gas sensing technology: A review. *IEEE Sensors Journal*, v. 22, n. 1, p. 6–15, 2022. 29

SATO, S. K. Mobilidade, comunicação e consumo: Expressões da telefonia celular em Angola, Brasil e Portugal. Monografia (tese) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. 21

SCHIRMER, W. N. et al. A poluição do ar em ambientes internos e a síndrome dos edifícios doentes. *Ciência & Saúde Coletiva*, SciELO Brasil, v. 16, p. 3583–3590, 2011. 19

SENSIRION. Datasheet Sensirion SCD30 Sensor Module. 2020. Disponível em: https://sensirion.com/media/documents/4EAF6AF8/61652C3C/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf>. 33, 34, 35, 36, 73

SILVA, I. F. D. Determinação da concentração de material particulado na região centrsal de Uberlândia. Tese (Doutorado), 2018. 37

SILVA, J.; REGUEIRO, E.; DINIS, M. A. P. Avaliação da qualidade do ar interior num bloco operatório e numa central de esterilização utilizando como indicador a concentração de dióxido de carbono. Edições Universidade Fernando Pessoa, 2007. 17

SOBREIRA, C. D. d. B. Avaliação do desempenho da ventilação natural em lares de idosos. Tese (Doutorado), 2015. 19

SÔNEGO, A. A.; MARCELINO, R.; GRUBER, V. A internet das coisas aplicada ao conceito de eficiência energética: uma análise quantitativo-qualitativa do estado da arte da literatura. *AtoZ: novas práticas em informação e conhecimento*, v. 5, n. 2, p. 80–90, 2016. 21

STALLINGS, W. Arquitetura e Organização de Computadores 10a Edição. [S.l.]: São Paulo: Prentice Hall do Brasil, 2017. 22

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. *Mecânica dos Fluidos.* 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982. 105

TESTO. *Kit CO com Bluetooth - testo 440.* 2023. Disponível em: <https://www.testo.com/pt-BR/testo-440-co2-kit-with-bluetooth-r/p/0563-4405>. Acesso em: 21 ago. 2023. 117

TESTO. Testo 405 i - termoanemômetro com App. 2023. Disponível em: <https://www.testo.com/pt-BR/testo-405-i/p/0560-1405>. Acesso em: 21 dez. 2023. 92

TOMEI, G. P. D. S. Desenvolvimento de um protótipo de um robô de cinemática paralela do tipo delta para impressão tridimensional de peças. Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em: https://www.univates.br/bduserver/api/core/bitstreams/034ef657-66fa-449f-abb7-202ae840485a/content>. Acesso em: 15 fev. 2023. 39, 40

USINA IND. COMÉRCIO E IMPORTAÇÃO. Sensor AHT10 de Alta Precisão para Medir Temperatura e Umidade. 2024. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-temperatura/ sensor-aht10-de-alta-precisao-para-medir-temperatura-e-umidade-5691.html. Acesso em: 15 fev. 2024. 121

VENTURI FILHO, S. N. Fundamentos de redes de computadores. [S.l.]: Seses, 2016. ISBN 978-85-5548-257-1. 23, 24

VIKULOV, A.; PARAMONOV, A. Practical retrospective of 5-year evolution of the ieee 802.11 client device capabilities. In: IEEE. 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). [S.1.], 2020. p. 296–300. 24

VUOLO, J. H. Fundamentos da Teoria de Erros. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996. 116, 119

WHITE, F. M. Fluid Mechanics. 3. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1994. 105

WIKIPEDIA. Coefficient of determination. 2024. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination#As_squared_correlation_coefficient. Acesso em: 12 jan. 2021. 112

WILLIAM, F.; WARGOCKI, P.; ZHANG, X. Do indoor co2 levels directly affect perceived air quality, health, or work performance? *ASHRAE Journal*, 2019. 17

YOKOGAWA, E. C. Clamp-on Power Analyzer CW240 (DISCONTINUED). 2023. Disponível em: https://tmi.yokogawa.com/solutions/discontinued/ model-cw240-clamp-on-power-meters/>. Acesso em: 12 jan. 2021. 108

YOKOGAWA, ELECTRIC CORPORATION. User's Manual - CW240 Clamp-on Power Meter. 2004. Disponível em: https://cdn.tmi.yokogawa.com/IMCW240E_010.pdf. Acesso em: 12 jan. 2021. 109

ZHANG, R.; CHUNG, H. S.-h. A triac-dimmable led lamp driver with wide dimming range. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 29, n. 3, p. 1434–1446, 2014. 39

Apêndices

APÊNDICE A – ENSAIOS PARA O CONTROLE DE VELOCIDADE DO VENTILADOR MONOFÁSICO

Com o intuito de conhecer a resposta do ventilador sob a influência do módulo de controle de potência, foram realizados ensaios experimentais, com o apoio do Laboratório de Eletricidade e Eletrônica do IFSC, campus São José.

A ativação do ventilador foi regulada pelo módulo de controle de potência, utilizando a modulação PWM, conforme detalhado na subseção 3.1.2. A variação do nível de controle ocorreu de 0 a 70, seguindo instruções do manual de configuração do dispositivo (MSS ELETRÔNICA, 2020), com intervalos de 5 unidades. Para cada nível de controle estabelecido, foram registrados dados elétricos (tensão, corrente efetiva, potência ativa e fator de potência) e fluidodinâmicos (velocidade média e vazão de ar insuflado pelo ventilador).

A medição da velocidade do ar foi realizada através de um anemômetro de fio quente da marca TESTO, modelo 405i Smart Probe (TESTO, 2023b). A vazão, por sua vez, foi calculada com base na velocidade medida e na área da seção transversal do bocal de saída do conector cônico adaptado à saída do ventilador. A Figura A.1 apresenta a disposição do procedimento experimental, enquanto a Figura A.2 destaca a configuração do sistema de aquisição e controle para o ensaio de caracterização do ventilador.



Figura A.1 – Montagem para o ensaio de caracterização do ventilador

Fonte: elaborada pelo autor.



Figura A.2 – Montagem do sistema de aquisição e controle

Fonte: elaborada pelo autor.

Ensaios iniciais de caracterização do exaustor

A presente seção trata dos resultados obtidos a partir dos ensaios iniciais conduzidos no exaustor. A fim de destacar o impacto da modulação de pulsos gerados pelo microcontrolador para o módulo controlador de potência que por sua vez atua no motor, foram analisados parâmetros como velocidade do ar na exaustão do ventilador, potência ativa e corrente.

Na Figura A.3, pode-se observar o efeito da modulação de pulsos sobre a velocidade de rotação do rotor do ventilador (indicada pela velocidade do ar movimentado pelo ventilador). Observou-se que, abaixo do nível de controle 10, o motor não é capaz de movimentar o rotor do ventilador. Entre os níveis de controle 10 e 30, observa-se um comportamento quase linear, entretanto, logo em seguida, ocorre uma sensível redução da velocidade de rotação do rotor, ao mesmo tempo em que, conforme se observa na Figura A.4 e na Figura A.5, a corrente e a potência atingem um valor máximo. O efeito de redução da velocidade de rotação do rotor só é eliminado a partir do nível 40, quando então a velocidade do ventilador volta a apresentar um comportamento aproximadamente linear.

Ao analisar a Figura A.4 e a Figura A.5, pode-se constatar que, de maneira semelhante ao comportamento da velocidade, existe uma relação quase linear entre os níveis de controle 10 e 30. Contudo, já no nível de controle 31, tanto a corrente quanto a potência do motor do ventilador atingem seus valores máximos, mantendo-se praticamente constantes até o nível de controle 70. Assim, a correlação entre a velocidade e a corrente/potência revela-se não-linear, o que é inadequado para propósitos de controle.



Figura A.3 – Velocidade do ar na descarga do ventilador em função do nível de controle

Fonte: elaborada pelo autor.



Figura A.4 – Corrente em função do nível de controle

Fonte: elaborada pelo autor.

Diagnóstico e definição da solução

O fenômeno mencionado acima, refere-se à distorção harmônica na corrente de carga, que impacta a tensão fornecida ao motor monofásico através do dimmer. Quando o dimmer estava ajustado para o nível 35, a linearidade na relação entre potência e velocidade do motor foi comprometida. Em outras palavras, à medida em que mais potência era aplicada, a velocidade do motor não aumentava proporcionalmente, como esperado.

A presença de distorção harmônica na corrente de carga pode gerar flutuações na tensão fornecida ao motor, resultando em um desempenho instável (LOURENÇO, 2019).



Figura A.5 – Potência ativa em função do nível de controle

Fonte: elaborada pelo autor.

No cenário descrito, enquanto a potência atingia o nível máximo, a velocidade do motor caía drasticamente devido à tensão distorcida. Isso ocorreu porque a tensão fornecida ao motor foi comprometida pela presença de harmônicas na corrente.

Para resolver esse problema, foi implementado um filtro, utilizando indutores. O indutor é um dispositivo que oferece impedância reativa à corrente elétrica, que ajuda a reduzir as distorções harmônicas na corrente. A carga indutiva adicionada consiste em dois indutores (L1 e L2) em paralelo, com valores de indutância de 439,4 mH e 441,1 mH, respectivamente, resultando em uma indutância equivalente de 220,1 mH. A conexão da carga indutiva (indutores) em série com a carga (motor) diminui as harmônicas da corrente no motor, e, como consequência, ocorre a redução da distorção da tensão de alimentação no motor. O resultado desta implementação é a linearização da relação entre potência e velocidade, que simplifica a ação do controle.

Ensaios finais de caracterização do exaustor

Com a implementação da solução, observa-se a linearização no comportamento do motor, conforme evidenciado nas Figuras A.6, A.7 e A.8. Nelas é perceptível que as curvas de vazão de ar, corrente e potência se ajustaram de forma mais linear em relação aos níveis do dimmer.



Figura A.6 – Velocidade do ar na descarga do ventilador em função do nível de controle, com indutores

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura A.7 – Corrente em função do nível de controle, com indutores



Fonte: elaborada pelo autor.



Figura A.8 – Potência ativa em função do nível de controle, com indutores

Fonte: elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – DETALHAMENTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

Ambiente de testes

Os testes ocorreram na Sala 05 do Campus São José do IFSC (Figura A.5). O controle de temperatura do ambiente foi realizado por meio de um condicionador de ar do tipo split, com capacidade de 30.000 Btu/h, operando no regime de resfriamento. As Figuras B.1 e B.2 ilustram o ambiente de teste utilizado.



Figura B.1 – Ambiente de teste (Sala 05)

Fonte: Elaborada pelo autor.

O insuffamento de ar de renovação na sala foi obtido mediante a instalação do ventilador do tipo centrífugo em linha, marca MULTIVAC, modelo AXC 250A (MULTIVAC, 2017) (Figura 17). O ventilador foi instalado externamente à sala, junto ao corredor de acesso (Figura B.3), e o ar era insuffado na sala mediante um duto de insuffamento, conectando o bocal de exaustão do ventilador e a parede da sala (Figuras B.4 e B.5). O duto de insuffamento possuía comprimento de 1,25m e diâmetro interno de aproximadamente

145mm, o que exigiu a adaptação de uma conexão cônica entre o bocal de exaustão e o duto de insuflamento (Figura B.6).



Figura B.2 – Ambiente de teste (Sala 05)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B.3 – Instalação do ventilador à entrada da Sala 05



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B.4 – Aspecto do duto de ar de insuflamento, posicionado entre o ventilador e a Sala $05\,$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B.5 – Detalhe do bocal de saída do duto de insuflamento, posicionado dentro da Sala05



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B.6 – Detalhe do cone de transição entre o bocal de saída do ventilador e o duto de insuflamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

Medição das dimensões do ambiente de teste

Para determinação das dimensões da sala de ensaios, necessárias para a determinação da área de pavimento e o volume interno da sala, foi utilizada uma trena digital da marca Bosch, modelo GLM 40, com incremento digital de 1 mm. Foram realizadas 6 repetições de cada medida, possibilitando a avaliação da repetitividade da medição. A temperatura ambiente durante a medição não foi monitorada. A Tabela B.1 apresenta os resultados da medição.

Tabela l	B.1 –	Dimensões	da	sala
Tabela I	D.I –	Dimensoes	aa	sala

Medida	Comprimento [m]	Largura [m]	Altura [m]		
1	9,192	$5,\!919$	2,992		
2	9,185	5,824	2,997		
3	9,195	$5,\!819$	2,994		
4	9,188	$5,\!805$	2,980		
5	9,183	$5,\!819$	2,986		
6	9,181	$5,\!810$	2,984		
média	9,187	5,816	2,989		
desvio padrão	0,005	0,007	0,007		
Fonte: Flaborada pelo autor					

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com estes resultados, a área de pavimento resulta em 53,43 m^2 e o volume interno da sala em 159,7 m^3 . No Apêndice F serão apresentadas as incertezas de medição relativas a estas medidas.

Instrumentação

A identificação, configuração e características metrológicas do protótipo de monitoramento e controle, bem como dos diferentes Sistema de medição (SM) auxiliares, foram apresentadas no Capítulo 3.

Os sensores dos SM eram posicionados em um ponto aproximadamente central em relação à sala, conforme indicado na Figura B.7. A Figura B.8 mostra um detalhe da medição com o SM Testo 440.



Figura B.7 – Posicionamento dos SM no ambiente de teste

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura B.8 – Detalhe da medição com o SM Testo 440



Fonte: Elaborada pelo autor.

Geração de CO_2

Para a maioria dos ensaios de validação, a geração de CO_2 interna foi realizada artificialmente, mediante a liberação controlada do gás a partir de uma garrafa, equipada com válvula reguladora de pressão da marca FAMABRAS, modelo RI-50P, especificamente calibrada para uso com CO_2 . Esta válvula realiza, concomitantemente, a redução da pressão do gás e o controle de sua vazão, mediante o emprego de um orifício calibrado. A vazão é indicada por um manômetro, devidamente calibrado em unidades de vazão. A Figura B.9 ilustra o equipamento de geração de CO_2 utilizado. A Figura B.10 ilustra a válvula reguladora de pressão e controle de vazão.



Figura B.9 – Equipamento de geração de CO_2

Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura B.10 – Válvula redutora de pressão de CO_2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Aquisição de dados

Durante os ensaios, os dados obtidos pelo protótipo foram armazenados em nuvem, conforme descrito no Capítulo 3. Após a conclusão do ensaio, as informações foram gravadas em planilha eletrônica. Outrosim, os dados obtidos pelo SM Testo 440 foram armazenados na memória do próprio SM e também passaram por registro em planilha eletrônica. As informações cpolhidas pelos demais SM auxiliares foram compiladas manualmente, por leitura direta e anotação. Posteriormente, do mesmo modo, os dados foram transcritos para planilhas, tendo sido todos devidamente processados, para se obter os resultados desejados.

Procedimento de ensaios

O condicionador de ar na sala permaneceu desligado em todos os ensaios, exceto no teste sob condições reais (sala ocupada), quando foi mantido ligado continuamente, ajustado para uma temperatura de 23°C.

Antes de cada ensaio, o ambiente era ventilado para eliminar qualquer excesso de dióxido de carbono remanescente da ocupação anterior. O procedimento era considerado concluído quando a medição da concentração interna de CO_2 na sala atingia valor aproximadamente equivalente à concentração de CO_2 no ar externo, medida no mesmo momento.

Após essa etapa, portas e janelas eram fechadas, deixando apenas uma seção da janela parcialmente aberta, com uma pequena fresta, para permitir a exaustão do ar. Essa abertura estava localizada na parede oposta à tubulação de insuflamento, garantindo adequada mistura e homogeneização do ar interno. Para promover a mistura homogênea do CO_2 gerado no ambiente, os ventiladores circuladores de ar, presentes no ambiente de teste (conforme mostrado na Figura B.1), foram mantidos em funcionamento.

Após a preparação inicial, os sistemas de medição eram inicializados, e o sistema de geração de CO_2 era configurado e inicializado. A sala era então desocupada, e a porta mantida fechada durante a realização do ensaio. Os dados foram monitorados remotamente do lado externo da sala. A duração total dos ensaios de validação foi de 50 minutos.

APÊNDICE C – CÁLCULO DA VAZÃO DE AR EXTERNO

Para a análise dos dados experimentais de concentração de gás CO_2 no ambiente, fazia-se necessário ter o conhecimento da efetiva vazão de ar externo insuflada pelo exaustor.

É sabido (WHITE, 1994; STREETER; WYLIE, 1982) que a informação de vazão de ar nominal, fornecida para determinado exaustor, indica uma vazão obtida em ensaios experimentais padronizados, e que, operando este exaustor em qualquer instalação real, a vazão de ar resultante será definida pela interação entre o próprio exaustor e as características fluído-dinâmicas da instalação, ou seja, a vazão de ar efetivamente obtida irá depender dos valores de perda de carga da instalação.

No entando, dadas as características do ambiente de teste, onde a exfiltração de ar era realizada através de frestas e aberturas, a determinação teórica ou experimental da efetiva perda de carga na instalação tornou-se inviável, visto que esta seria influenciada por condições atmosféricas, principalmente a intensidade de ventos (ASHRAE, 2013).

Nesse sentido, a medição direta da vazão de ar de insuflamento também se mostra uma tarefa bastante complexa (WHITE, 1994; STREETER; WYLIE, 1982) e resultou impraticável no contexto de recursos e tempo do presente trabalho.

Sendo assim, para auxiliar na análise dos dados experimentais e na avaliação da eficácia do sistema de ventilação, buscou-se determinar a vazão de ar externo insuflada na sala de teste por meio indireto, empregandos métodos de cálculo capazes de determinar tal variável, a partir da própria medição da concentração de CO_2 na sala.

Admitindo-se as seguintes hipóteses:

- i. o insuflamento de ar externo é o único processo significativo de remoção do gás CO₂;
- ii. o ar interno ao ambiente é completamente e perfeitamente misturado;
- iii. a intensidade da geração de CO_2 internamente ao ambiente e a taxa de ventilação estejam estáveis no período;
- iv. a vazão de ar externo insuflado no ambiente pelo exaustor é exatamente igual à vazão de ar exaurido do ambiente (através de frestas e aberturas);

A aplicação do princípio de conservação de massa ao gás CO_2 presente no ambiente de testes fornece a equação C.0.1 (ASHRAE, 2013):

$$\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t} = \frac{G + \dot{Q} \cdot (C_{in} - C_{out})}{V_{amb}} \tag{C.0.1}$$

onde:

 $\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}=$ taxa de variação da concentração de CO_2

$$[ml(CO_2)/(m^3(ar).s] \text{ ou } [ppm_v(CO_2)/s]$$

 $G = taxa de geração de CO_2$ internamente ao ambiente $[ml(CO_2)/s]$

 \dot{Q} = vazão de ar externo insuflado no ambiente (renovação) [m³/s]

 ${\cal C}_{in}=$ concentração de ${\cal CO}_2$ do ar externo insuflado no ambiente

 $[ml(CO_2)/(m^3(ar))]$ ou $[ppm_v(CO_2)]$

 $C_{out} = \text{concentração de } CO_2$ do ar interno exaurido do ambiente

$$[\mathrm{ml}(\mathrm{CO}_2)/(\mathrm{m}^3(\mathrm{ar})] \text{ ou } [\mathrm{ppm}_v(CO_2)]$$

 V_{amb} = volume total de ar no ambiente $[m^3]$.

Por sua vez, a taxa de variação da concentração de CO_2 no ambiente pode ser discretizada, utilizando-se os valores medidos entre dois tempos distintos, como demostrado na equação C.0.2.

$$\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t} = \frac{C_{amb}(t) - C_{amb}(t-1)}{\Delta t} \tag{C.0.2}$$

onde:

 $C_{amb}(t) = \text{concentração de } CO_2 \text{ do ar interno do ambiente no instante (t)}$

 $[ml(CO_2)/(m^3(ar))]$ ou $[ppm_v(CO_2)]$

 $C_{amb}(t-1) = \text{concentração de } CO_2 \text{ do ar interno do ambiente no instante anterior}$ $[\text{ml}(\text{CO}_2)/(\text{m}^3(\text{ar})] \text{ ou } [\text{ppm}_v(CO_2)]$

 Δt = diferença de tempo entre o instante (t) e o instante (t-1) [s].

Da hipótese (ii) acima elencada, pode-se admitir que a concentração de CO_2 do ar exaurido do ambiente (C_{out}) é igual à concentração de CO_2 do ar interno do ambiente (C_{amb}) , formando a C.0.3 :

$$C_{out} = \frac{C_{amb}(t) + C_{amb}(t-1)}{2}$$
(C.0.3)

Assim, a partir das medições da concentração de CO_2 no ambiente (C_{amb}) e no ar externo (C_{in}) , e da medição/definição da taxa de geração de CO_2 internamente ao ambiente (G), pode-se determinar a vazão de ar externo insuflada no ambiente a cada intervalo de tempo.

Os valores de vazão de ar externo assim obtidos, foram utilizados na análise dos dados experimentais no Capítulo 4.
APÊNDICE D – CALIBRAÇÃO DO SENSOR PZEM-004T

Introdução

Este apêndice descreve o procedimento para calibração do sensor PZEM-004T (PEACEFAIR, 2024), destinado à aferição de potência. Para a calibração, empregou-se o sistema de medição Yokogawa IM CW240 (YOKOGAWA, 2023) como sistema de referência. Obteve-se uma função de calibração a ser aplicada aos valores medidos.

Metodologia

Foram utilizados dois tipos de circuitos para este experimento. O primeiro consistiu em um circuito contendo apenas uma carga resistiva de 100 Ω , como apresentado na D.1. O segundo circuito incluiu uma carga resistiva de 100 Ω em paralelo com uma carga indutiva de 300 mH, conforme mostrado na D.2. Este segundo circuito foi projetado para simular as condições de medição encontradas em um motor elétrico.

No circuito com carga resistiva e indutiva (RL), as cargas foram conectadas em paralelo a uma fonte de tensão/corrente. Durante o experimento, foram coletadas medidas das grandezas de interesse, tais como tensão, corrente e potência elétrica. As medições foram realizadas tanto utilizando o sistema de referência como o sistema calibrado.





Fonte: Elaborada pelo autor.

Equipamentos

No Quadro D.1, são detalhadas as características metrológicas dos dois equipamentos utilizados para medição.

Figura D.2 – Circuito com carga resistiva e indutiva



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro D.1 – Características metrológicas do Yokogawa IM CW240 e do PZEM-004T

		Yokogawa 1	IM CW240		PZEM-004			
	Tensão	Corrente	Potência	FP	Tensão	Corrente	Potência	FP
Faixa de operação	$0{\sim}300\mathrm{V}$	0~50A	$0 \sim 15 \text{kW}$	0~1,000	80~260V	0~10A	0∼2,3kW	0~1,00
Resolução	0,1	0,001	0,1	0,001	0,1V	0,001A	0,1W	0,01
Incerteza	$0,\!1\%$	$0,\!4\%$	$0,\!4\%$	0,4%	0,5%	0,5%	0,5%	1%
							`	1

Fonte: adaptado de YOKOGAWA (2004) e PEACEFAIR (2024).

Ao analisar essas características, é evidente que o equipamento da marca Yokogawa se destaca, mostrando desempenho igual ou superior em quase todos os parâmetros avaliados, como faixa de operação, resolução e taxa de incerteza. Diante dessa análise comparativa, decidiu-se utilizar o equipamento da Yokogawa para o processo de calibração, uma vez que sua superioridade em diversas métricas oferece maior confiabilidade e precisão aos resultados obtidos.

Procedimento

Após a configuração inicial do circuito, procedeu-se à conexão do sistema de referência ao mesmo. Em seguida, o circuito foi energizado, ajustando-se a fonte de tensão/corrente controlada para os valores desejados. Os valores das grandezas elétricas de interesse foram então registrados pelo sistema de medição de referência. Posteriormente, o circuito foi desenergizado e o sistema de medição de referência substituído pelo sistema de medição a ser calibrado, mantendo-se inalterados os demais componentes do circuito e os ajustes da fonte de tensão/corrente. Após a troca, o circuito foi novamente energizado e os valores das grandezas elétricas de interesse registrados pelo sistema de medição a ser calibrado.

Resultados

Os resultados das medições estão resumidos no Tabela D.1. Nas Figuras D.3 e D.4, são apresentados os erros de medição para a corrente e a potência ativa, respectivamente.

	Yokogawa				PZEM-004			
Teste com carga resistiva pura (100 Ω)								
CARCA	Tensão	Corrente	Potência	FP	Tensão	Corrente	Potência	FP
CARGA	[V]	[A]	$[\mathbf{W}]$	[-]	[V]	$[\mathbf{A}]$	[W]	[-]
0 W	221,9	0,045	6,7		221,8	0,043	7,9	
aprox. 20 W	223,0	0,092	20,0	0,680	222,9	0,109	23,6	0,82
aprox. 50 W	223,1	0,224	50,0	0,960	222,7	0,254	57,4	0,97
aprox. 100 W	220,8	0,450	100,0	1,000	220,9	0,520	114,8	1,00
aprox. 150 W	220,0	0,677	150,0	1,000	219,9	0,784	172,1	1,00
aprox. 200 W	219,7	0,908	200,0	1,000	219,4	1,048	230,0	1,00
aprox. 250 W	219,2	1,137	250,0	1,000	219,0	1,314	287,0	1,00
	Teste	com carga i	resistiva (1)	00 Ω) ε	e indutiva	(300 mH)		
CARCA	Tensão	Corrente	Potência	FP	Tensão	Corrente	Potência	FP
UANGA	[V]	[A]	[W]	[-]	[V]	$[\mathbf{A}]$	[W]	[-]
0 W	219,2	0,045	6,6	0,680	219,1	0,042	7,7	0,84
aprox. 20 W	218,4	0,108	20,0	0,850	218,2	0,122	22,7	0,85
aprox. 50 W	$220,\!6$	0,266	50,0	0,850	220,7	0,308	57,30	0,84
aprox. 100 W	220,1	0,540	100,0	0,840	219,9	0,624	114,3	0,83
aprox. 150 W	219,8	0,817	150,0	0,830	219,7	0,944	171,5	0,83
aprox. 200 W	219,8	1,094	200,0	0,830	219,8	1,266	228,8	0,82
aprox. 250 W	219,6	1,374	250,0	0,830	219,3	1,585	285,10	0,82

Tabela D.1 – Leituras obtidas no Yokogawa e no PZEM-004T

Fonte: Elaborada pelo autor.

O erro de medição é definido como a diferença entre o valor medido pelo sistema a ser avaliado e o sistema de medição de referência (INMETRO, 2012).



Figura D.3 – Erro de medição de corrente

Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro recurso importante é a representação dos valores obtidos pelo sistema a ser



Fonte: Elaborada pelo autor.

avaliado no eixo das abscissas e os valores do sistema de referência no eixo das ordenadas. A partir disso, é possível obter a função de calibração, conforme ilustrado nas Figuras D.5 e D.6. Elas mostram a correlação entre os valores medidos pelo sistema de referência e

pelo sistema a ser avaliado, tanto para a corrente quanto para a potência.



Figura D.5 – Correlação entre corrente medida e corrente referência

Fonte: Elaborada pelo autor.

CORRENTE MEDIDA (PZEM-004T) [A]

Os coeficientes que compõem as funções de calibração para corrente e potência ativa estão resumidos no Quadro D.2. Esses valores foram determinados com base nos



Figura D.6 – Correlação entre potência medida e potência referência

Fonte: Elaborada pelo autor.

cálculos descritos em Montgomery e Runger (2003) e Wikipedia (2024)).

Quadro D.2 – Coeficientes das correlações e coeficiente de determinação

Co	Correlação: corrente, real [A] x corrente, medida [A]							
a0	3,24408E-03							
a1	8,62611E-01							
R^2	9,999955 E-01							
Cor	relação: potência, real [W] x potência, medida [W]							
a0	-1,18718E-01							
a1	8,73084E-01							
R^2	9,99961E-01							

Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE E – CÁLCULO DA GERAÇÃO DE CO_2 NO AMBIENTE

Ambiente de ensaio

Para a determinação da quantidade de dióxido de carbono a ser gerada no ambiente durante os ensaios de validação, utilizou-se a metodologia proposta por (PERSILY; JONGE, 2017), em que a taxa de geração de CO_2 por um indivíduo é calculada pela Equação E.0.1:

$$V_{CO_2} = V_{O_2} RQ = \frac{0.00276 A_D M RQ}{0.23 RQ + 0.77}$$
(E.0.1)

onde:

 $V_{CO_2} =$ taxa de geração de CO_2 [1/s] $V_{O_2} =$ taxa de consumo de O_2 [l/s] $A_D =$ área de superfície corporal de DuBois [m²] M =taxa metabólica [met] RQ =quociente respiratório [-].

A área de superfície corporal nua, AD, é calculada pela Equação E.0.2 (DUBOIS; DUBOIS, 1916).

$$A_D = 0.202 \ H^{0.725} \ W^{0.425} \tag{E.0.2}$$

onde:

H =altura [m]W =massa corporal [kg].

O quociente respiratório RQ é a razão entre a taxa volumétrica em que o CO_2 é produzido e a taxa de consumo do oxigênio, cujo valor depende, principalmente, da dieta. Conforme proposto por (PERSILY; JONGE, 2017), os cálculos neste artigo empregam um único valor de RQ igual a 0,85.

Os dados de altura e massa corporal típicos para adolescentes brasileiros, atualizados, foram obtidos de Bertoldi (2021). Como se trata de salas de aula utilizadas por alunos na faixa etária do ensino médio, de 14 a 18 anos, utilizou-se para o cálculo os valores típicos para adolescentes no extremo superior da faixa, ou seja, com 18 anos: massa corporal 63,05 kg e altura de 174,5 cm para homens, e massa corporal de 54,39 kg e altura de 162,5 cm para mulheres.

Para o professor, utiliza como referência os dados para um homem brasileiro típico (IBGE, 2010), na faixa de 35 a 44 anos: massa corporal de 74,6 kg e altura de 171,0 cm.

A taxa metabólica para os alunos foi estimada em 1,4 met, conforme proposto por Persily e Jonge (2017). Para o professor, aplica-se o valor de 1,6 met sugerido por Fanger (1982) para uma pessoa desenvolvendo trabalho de laboratório.

Desse modo, para estimar a ocupação da sala, foram empregados os valores recomendados pela norma brasileira NBR 16401-3 (ABNT, 2008), que recomenda, para salas de aula, uma densidade de ocupação esperada de 35 pessoas por 100 m^2 de área de pavimento. Tendo a sala de aula utilizada para os ensaios dimensões de 9m de comprimento por 6m de largura e 3 m de altura, totalizando 54 m^2 de área de pavimento, a lotação máxima seria de 18 pessoas. Assim, estimou-se a ocupação da sala 8 alunos do sexo masculino, 8 alunos do sexo feminino, além do professor, totalizando 17 pessoas.

O Quadro E.1 apresenta a síntese dos cálculos. A taxa de geração total de CO_2 estimada resultou em 97,8578 ml/s, ou 5,87 l/min. Este é o valor a ser utilizado nos ensaios experimentais de validação da metodologia.

Ocupanto	quant.	W	Н	AD	М	RQ	Q(C	$O_2)$
Ocupante	[-]	[kg]	[m]	$[m^2]$	[met]	[-]	unit. $[ml/s]$	total $[ml/s]$
aluno masc.	8	63,05	1,745	1,7600	1,4	0,85	5,9872	47,8975
aluno fem.	8	54,39	1,625	1,5697	$1,\!4$	0,85	$5,\!3397$	42,7179
professor	1	74,60	1,710	1,8629	$1,\!6$	0,85	7,2424	7,2424
total								97,8578

Quadro E.1 – Cálculos de taxa de geração de CO_2 no recinto (simulação).

Para o volume da sala de aula (162 m^3), e considerando a concentração de CO_2 no ar atmosférico de 417,87 ppm em base molar (Global Monitoring Laboratory, 2023), correspondente a aproximadamente 414 ppm em base volumétrica, a taxa de geração acima calculada demandaria uma vazão volumétrica de ar externo da ordem de 602 m^3/h para a manutenção de um valor limite de concentração de CO_2 de 1.000 ppm (ABNT, 2008) em regime permanente (ASHRAE, 2013). Este valor de vazão de ar externo encontra-se dentro da faixa de capacidade do exaustor escolhido para o teste.

Fonte: elaborado pelo autor.

Ambiente ocupado por pessoas

Ocupanto	W	Н	AD	М	RQ	Q(CO2)
Ocupante	[kg]	[m]	[m^2]	[met]	[-]	ml/s
aluno 1	57	1,690	1,647	1,3	0,85	5,2040
aluno 2	60	1,710	1,698	1,3	0,85	5,3642
aluno 3	70	1,720	1,821	1,3	$0,\!85$	5,7517
aluno 4	89	1,760	2,050	1,3	0,85	6,4768
aluno 5	45	1,550	1,399	1,3	0,85	4,4205
aluno 6	52	1,600	1,523	1,3	$0,\!85$	4,8102
aluno 7	61	1,740	1,732	1,3	0,85	5,4706
aluno 8	46	1,500	1,379	1,3	$0,\!85$	4,3572
aluno 9	73	1,840	1,947	1,3	0,85	6,1486
aluno 10	70	1,700	1,805	1,3	$0,\!85$	5,7031
aluno 11	74	1,780	1,911	1,3	0,85	6,0374
aluno 12	63	1,770	1,778	1,3	$0,\!85$	5,6153
aluno 13	78	1,750	1,931	1,3	$0,\!85$	6,0984
aluno 14	70	1,750	1,844	1,3	0,85	5,8242
aluno 15	73	1,650	1,799	1,3	0,85	5,6814
aluno 16	65	1,770	1,801	1,3	0,85	5,6904
aluno 17	80	1,700	1,911	1,3	$0,\!85$	6,0361
aluno 18	59	1,700	$1,\!679$	1,3	$0,\!85$	5,3034
aluno 19	69	1,720	1,810	1,3	0,85	5,7166
aluno 20	54	1,670	1,596	1,3	$0,\!85$	5,0421
aluno 21	87	1,810	2,072	1,3	$0,\!85$	6,5461
aluno 22	70	1,700	1,805	1,3	0,85	5,7031
aluno 23	60	1,800	1,763	1,3	$0,\!85$	5,5675
aluno 24	65	1,680	1,735	1,3	0,85	5,4791
aluno 25	94	1,750	2,090	1,3	0,85	6,6016
aluno 26	56	1,830	1,732	1,3	0,85	5,4718
aluno 27	78	1,790	1,963	1,3	0,85	6,1991
professor	85	1,760	2,011	1,4	0,85	6,8400
total						159,1604

Quadro E.2 – Cálculos de taxa de geração de CO_2 no ambiente ocupado.

Fonte:	elaborado	pelo	autor.

O Quadro E.2 apresenta a síntese dos cálculos, em que a taxa de geração total de CO_2 estimada resultou em 159,1604 ml/s, ou 9,5496 l/min.

APÊNDICE F – INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

A terminologia empregada nesta seção, e ao longo do presente trabalho, segue a normatização brasileira, bem como as demais normas internacionais presentemente aplicáveis à ciência da metrologia (ALBERTAZZI Jr.; SOUZA, 2008; VUOLO, 1996; IN-METRO, 2012). Pelas características intrínsecas ao processo de mensuração, as grandezas físicas apresentadas ao longo do trabalho foram divididas em dois grupos. As grandezas qualificadas como primárias são aquelas cujo valor é determinado por um procedimento de medição específico, empregando-se um SM apropriado. A seu turno, as grandezas qualificadas como derivadas são aquelas cujo valor é determinado por um procedimento de cálculo definido por um modelo matemático apropriado, a partir dos valores das grandezas primárias e de outras grandezas secundárias.

Grandezas físicas primárias

Entre as grandezas físicas primárias, em função dos procedimentos de medição característicos, fez-se necessária a distinção entre 2 grupos, a seguir apresentados. Para a determinação da incerteza de medição expandida, sempre que possível, utilizou-se a combinação de erros tipo A (definidos por métodos estatísticos) e tipo B (métodos não-estatísticos) (VUOLO, 1996).

Grandezas geométricas

Dentre as grandezas geométricas medidas, as diversas medições de comprimento para definição das dimensões da sala de teste, e as medições de diâmetro interno do bocal de exaustão do ventilador, foram realizadas pelo método direto, ou seja, por comparação direta com uma escala graduada. Para a medição de comprimento, foi utilizada uma trena com incremento digital (ID) de 1 mm. Foram realizadas 6 repetições de cada medida, possibilitando a avaliação da repetitividade da medição. A temperatura ambiente no momento da medição não foi monitorada. Para medir o diâmetro interno do bocal de exaustão do ventilador foi utilizado um paquímetro com divisão de escala de 0,05 mm. Pelas características deste SM, considerou-se a incerteza de medição igual à divisão de escala. O erro tipo A foi determinado a partir do desvio padrão das medições, apresentado na Tabela B.1. A exceção fica por conta da medição do diâmetro interno do bocal de exaustão, para o qual não foram realizadas repetições. O erro tipo B foi determinado a partir da resolução do instrumento. A Quadro F.1 apresenta uma síntese dos resultados obtidos, em que "Re" e "IM" representam, respectivamente, a resolução do instrumento e a incerteza de medição.

Quadro F.1 – Incertezas de medição: grandezas geométricas

Grandeza física	tipo de medição	SM	unidade física	Re	IM \pm	
comprimento	direta	trena digital	[m]	0,001	0,014	
largura	direta	trena digital	[m]	0,001	0,019	
altura	direta	trena digital	[m]	0,001	$0,\!017$	
diâmetro	direta	paquímetro	[mm]	$0,\!05$	$0,\!050$	
Fonte: elaborado pelo autor.						

Grandezas termo-fluidodinâmicas

Nos ensaios experimentais, o sistema de medição desenvolvido foi utilizado para medir a temperatura de bulbo seco, a umidade relativa, a concentração de CO_2 , e a contagem de material particulado de diâmetro inferior a 2,5 $\mu m.(PM_{2,5})$, conforme descrito na seção 4.1 deste documento.

O sistema de medição de referência Testo 440 foi utilizado para medir temperatura de bulbo seco, a umidade relativa, a concentração de CO_2 , e a pressão ambiente.

A vazão de CO_2 gerada foi medida indiretamente por meio da medição da pressão após a válvula de expansão.

Estas grandezas são classificadas como grandezas dinâmicas, por apresentarem variação contínua ao longo do processo de medição. Desta forma, um processo de mensuração estatística foi empregado, em uma condição de teste aproximadamente estática, ou seja, com o sistema de refrigeração desligado, e a temperatura ambiente mantida tão constante quanto possível.

O erro tipo A foi determinado a partir do desvio padrão das medições nas condições estáticas de teste. O erro tipo B foi determinado a partir da resolução do instrumento, considerado igual ao incremento digital.

Nos casos da medição de velocidade do ar e da vazão de CO_2 , a repetibilidade estatística não pode ser aferida, de forma que, para estas medições, a incerteza de medição foi determinada apenas a partir de erro do tipo B. Para a medição da velocidade do ar, foi utilizada a informação de acurácia informada em manual (TESTO, 2023a). Para a vazão de CO_2 , a incerteza de medição foi considerada igual à resolução. A Tabela F.1 apresenta a síntese dos resultados obtidos.

No processo de mensuração, foram observados os seguintes erros sistemáticos do sensor SCD30 em relação ao sistema de medição Testo 440, apresentados na Tabela F.2.

Grandeza física	tipo de medição	SM	unidade física	Re	IM \pm
temperatura	direta	SCD30	[°C]	0,1	0,9
umidade relativa	direta	SCD30	[%]	0,1	2,6
concentração de CO_2	direta	SCD30	[ppm]	1	20
$\mathrm{PM}_{2,5}$	direta	HPMA115cO-004	$[\mu g/m^3]$	1	15
temperatura	direta	Testo 440	[°C]	0,1	$1,\!0$
umidade relativa	direta	Testo 440	[%]	0,1	$2,\!8$
concentração de CO_2	direta	Testo 440	[ppm]	1	8
pressão ambiente	direta	Testo 440	[hPa]	0,1	$_{0,5}$
velocidade do ar	direta	Testo 440	[m/s]	$0,\!01$	1,05
vazão de CO_2	direta	manômetro	[l/m]	$1,\!0$	$1,\!0$
	Fonte: elabo	orada pelo autor.			

Tabela F.1 – Incertezas de medição: grandezas termo-fluidodinâmicas

Tabela F.2 – Erros sistemáticos do sensor SCD30

Grandeza física	tipo de medição	SM	unidade física	Erro sistemático			
temperatura	direta	SCD30	[°C]	+5,3			
umidade relativa	direta	SCD30	[%]	+0,9			
concentração de co 2	direta	SCD30	[ppm]	-9			
Fonte: elaborada pelo autor.							

Cabe observar que os erros sistemáticos observados não foram compensados, devido à incerteza quanto à validade do certificado de calibração do sistema Testo 440.

Grandezas elétricas

Conforme descrito na seção 3.7, nos ensaios de caracterização do motor do ventilador foram realizadas medições de grandezas elétricas, com o emprego do sensor PZEM-004 (Apêndice D). As incertezas de medição estão representadas na Tabela F.3. Apesar de se tratar de grandezas dinâmicas (isto é, que apresentam variação ao longo do processo de medição), não foi realizado ensaio para determinar a repetibilidade das medições. Desse modo, para os parâmetros descritos, a incerteza de medição foi determinada apenas a partir de erro do tipo B.

Tabela F.3 – Incertezas de medição: grandezas elétricas

Grandeza física	tipo de medição	SM	unidade física	Re	IM		
tensão elétrica	direta	PZEM 004	[V]	0,1	0,1		
corrente elétrica	direta	PZEM 004	[A]	$0,\!01$	0,001		
potência elétrica	direta	PZEM 004	[W]	0,1	0,1		
Fonte: elaborada pelo autor.							

Grandezas físicas derivadas

Em relação às grandezas físicas derivadas, ou seja, calculadas em função das grandezas físicas primárias ou de outras grandezas derivadas, foi aplicado o método de propagação de incertezas (VUOLO, 1996; ALBERTAZZI Jr.; SOUZA, 2008). Visando facilidade de interpretação dos resultados, manter-se-á a distinção entre as grandezas geométricas (invariáveis) e as referentes à qualidade do ar (variáveis).

Grandezas geométricas

A Tabela F.5 apresenta os valores da incerteza do resultado associada às grandezas geométricas (invariáveis) derivadas.

Tabela F.4 –	- Incertezas	de medi	ção (IN	Λ):	grandezas	geométricas	derivadas
--------------	--------------	---------	---------	--------------	-----------	-------------	-----------

Grandeza física derivada	método	unidade física	IM \pm				
volume da sala	função direta	$[m^{3}]$	1,1				
área do pavimento	função direta	$[m^2]$	$0,\!19$				
área de seção transversal do duto	função direta	$[m^2]$	1,1E-05				
Fonte: elaborada pelo autor.							

Grandezas termo-fluidodinâmicas

A Tabela F.5 apresenta os valores da incerteza do resultado associada às variáveis termo-fluidodinâmicas derivadas. A vazão de ar externo é aquela calculada segundo o método apresentado no Apêndice C. A vazão de ar insuflado, por sua vez, é calculada nos ensaios de caracterização do ventilador (descritos na seção 3.7), a partir dos dados de área do bocal e medição da velocidade média.

Tabela F.5 – Incertezas de medição: grandezas termo-fluidodinâmicas derivadas

Grandeza física derivada	método	unidade física	IM	valor típico	IM percentual		
vazão de ar externo	Equação C.0.1	[m3/s]	1,165	0,2	82,4%		
vazão de ar insuflado	${{{ \acute{a}rea}^{*}velocidade}}$	[m3/s]	0,0162	$0,\!27$	6,0%		
Fonte: elaborada pelo autor.							

Cabe notar que o valor da incerteza do resultado é significativo para o cálculo da vazão de ar externo. Isto se deve às incertezas relativamente elevadas nas medições de concentração e vazão de CO_2 gerado internamente (Tabela F.1).

APÊNDICE G – ORÇAMENTO DO PROJETO

O custo total associado à aquisição de materiais e equipamentos necessários para o projeto é de R\$ 2026,92 (Tabela G.1), composto da seguinte forma:

O microcontrolador ESP8266, amplamente disponível no mercado nacional, tem o preço unitário de R\$ 21,08 (CURTO CIRCUITO, 2024a). O módulo de controle de potência DM02A está disponível no site do fabricante por R\$ 59,90 (MSS ELETRONICA, 2024), enquanto o exaustor centrífugo AXC 250 A tem o preço unitário de R\$ 884,05, também no site do fabricante (MULTIVAC, 2024).

Os sensores SCD30 e HPMA115C0-004 não são facilmente encontrados no mercado nacional, necessitando sua importação. Para esses itens, consideramos a importação de 50 sensores. O preço unitário encontrado no mercado internacional, sem impostos, foi de \$39,65 para o SCD30 (MOUSER ELETRONICS, 2024b) e \$72,49 para o HPMA115C0-004 (MOUSER ELETRONICS, 2024a). O preço final unitário foi calculado considerando uma taxa de conversão monetária de 4,97, somando o imposto de importação de 60%, ICMS de 12% (aplicável no estado de Santa Catarina) e IOF de 6,38%, resultando em R\$ 377,31 para o SCD30 e R\$ 684,58 para o HPMA115C0-004.

Os custos mencionados incluem apenas os valores referentes à aquisição de materiais e equipamentos. Outros custos relacionados à mão de obra, logística, instalação e manutenção não foram incluídos nesta análise e devem ser considerados separadamente.

Descrição	Item	Valor
NodeMCU V3 - ESP82266	Microcontrolador	R\$ 21,08
Módulo DM02A	Atuador	R 59,90
AXC 250 A	Exaustor	R 884.05
SCD30	Sensor	R\$ 377,31
HPMA115C0-004	Sensor	R $$684,58$
Total		R\$ 2.026,92

Tabela G.1 – Orçamento

Fonte: elaborada pelo autor.

Outros itens analisados

Os itens da Tabela G.2 foram analisados e posteriormente descartados para execução deste projeto.

O Arduíno UNO R3 (ELETROGATE, 2024b) e o ESP32 (CURTO CIRCUITO, 2024b) possuem valores superiores ao microcontrolador ESP8266 que foi adotado. O sensor T6615-10K (MOUSER ELETRONICS, 2024c) também possui um valor superior ao SCD30, sendo um dos motivos para seu descarte.

Os sensores AHT10 (USINAINFO, 2024) e o DHT11 (ELETROGATE, 2024a), respectivamente de temperatura e umidade relativa do ar, foram analisados para implementação. No entanto, como o SCD30 já contempla essas medidas, foram descartados por não serem necessários.

Descrição	Item	Valor
Arduíno UNO R3	Microcontrolador	R 85,40
ESP32	Microcontrolador	R\$ 45,35
T6615-10K	Sensor	R\$ 819,16
AHT10	Sensor	R 12,30
DHT11	Sensor	R\$ 10,36

Tabela G.2 – Outros itens analisados

Fonte: elaborada pelo autor.