

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

IVAN JORGE BOESING

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA  
QUALIDADE DO AR EM ESCOLAS, DO  
HARDWARE AOS DADOS: CENÁRIOS  
PRÉ E PÓS COVID-19**

Tese apresentada como requisito parcial para a  
obtenção do grau de Doutor em Informática na  
Educação

Orientador: Prof. Dr. Dante Augusto Couto  
Barone

Porto Alegre

## CIP — CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Boesing, Ivan Jorge

SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR EM ESCOLAS, DO HARDWARE AOS DADOS: CENÁRIOS PRÉ E PÓS COVID-19 / Ivan Jorge Boesing. – Porto Alegre: PGIE da UFRGS, 2023.

217 f.: il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. , Porto Alegre, BR–RS, 2023. Orientador: Dante Augusto Couto Barone.

1. Qualidade do ar. 2. Poluentes. 3. COVID-19. 4. Educação. 5. Cognição e saúde. I. Barone, Dante Augusto Couto. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Dr. Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Patricia Pranke

Pró Reitor de Pós-Graduação: Prof. Júlio Otávio Jardim Barcellos

Diretor do Centro Interdisciplinar de Novas Tecnologias na Educação (CINTED):: Prof. Dr. Marcus Vinicius de Azevedo Basso

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Informática na Educação:: Prof. Dr. Dante Augusto Couto Barone

*Dedico à minha família, que soube se privar  
da minha presença mental durante longos períodos,  
ficando apenas com o corpo físico presente em nosso lar.  
Muito agradecido à vocês Patrícia, Júlia e Augusto.*

## **AGRADECIMENTOS**

Durante o percurso desta pesquisa foram encontradas pequenas e grandes pedras a serem removidas, a fim de continuar pelo caminho que me trouxe até aqui. A maioria consegui mover sozinho, mas muitas delas consegui com o auxílio de pessoas muito especiais.

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Dante Barone, que acreditou no meu potencial desde que o conheço, e que, sem esse suporte não teria chegado até aqui.

Agradeço aos que me auxiliaram de forma técnica ou dos quais utilizei seu conhecimento para conseguir alcançar os objetivos lançados nesta pesquisa. Cito alguns em especial: Guilherme Balbinot, Gustavo Selbach, Daniel Hanauer, Rafael Quadros, Pedro Souza e Jaime Riascos Salas.

Agradeço ao Colégio Sinodal São Leopoldo, que abriu as portas para este projeto de pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio na produção desta pesquisa.

## RESUMO

O ar que respiramos afeta diretamente a saúde e necessitamos do oxigênio nele contido para realizarmos o metabolismo celular que nos dá energia. Poucos minutos sem oxigênio pode nos levar a morte. Muito tempo sem um ar de qualidade pode afetar nosso organismo de diversas formas. Este trabalho buscou entender como o nosso enclausuramento durante muitas horas do dia dentro de edificações acabou criando um ambiente que muitas vezes é insalubre para a nossa saúde. A partir do conceito estabelecido da Síndrome do Prédio Doente, foram analisados os poluentes biológicos e químicos que existem nestes ambientes. Outro objeto foi o entendimento de como a comunidade científica analisa a correlação entre os poluentes do ar interno e a saúde e/ou a cognição. Após este entendimento, foi realizada uma busca em trabalhos correlatos a fim de verificar o que já é estabelecido pela comunidade científica brasileira e mundial e como seria possível contribuir com ferramentas aprimoradas e com foco no uso em território brasileiro. O desenvolvimento de um hardware adequado para capturar as principais variáveis ambientais (temperatura e umidade relativa do ar) e poluentes (dióxido de carbono, material particulado e compostos orgânicos voláteis) com foco em baixo custo e qualidade foi realizado. O acompanhamento dos dados coletados de forma que os mesmos fossem passíveis de serem acompanhados de forma on line pela internet também foi realizado. Por fim, com o experimento tendo transpassado o período pré e pós COVID-19, afetando o planejamento original, mas resultando em uma oportunidade única para comparar como o comportamento diverso entre os dois períodos afetou a qualidade do ar em ambiente escolar, foi possível verificar que ações simples que contribuem para a troca de ar através da ventilação natural, podem aumentar significativamente a salubridade do ambiente.

**Palavras-chave:** Qualidade do ar. Poluentes. COVID-19. Educação. Cognição e saúde.

## ABSTRACT

The air we breathe directly affects our health, and we need the oxygen it contains to carry out the cellular metabolism that gives us energy. A few minutes without oxygen can lead to death. Too much time without quality air can affect our organism in many ways. This work sought to understand how our enclosure for many hours a day inside buildings ended up creating an environment that is often unhealthy for our health. Based on the established concept of the Sick Building Syndrome, the biological and chemical pollutants that exist in these environments were analyzed. Another object was to understand how the scientific community analyzes the correlation between indoor air pollutants and health and/or cognition. After this understanding, a search was made in correlated works in order to verify what is already established by the Brazilian and world scientific community and how it would be possible to contribute with improved tools focused on the use in Brazilian territory. The development of appropriate hardware to capture the main environmental variables (air temperature and relative humidity) and pollutants (carbon dioxide, particulate matter, and volatile organic compounds) with a focus on low cost and quality was carried out. The monitoring of the collected data so that it could be followed up on line through the internet was also carried out. Finally, with the experiment having transgressed the pre and post COVID-19 period, affecting the original planning, but resulting in a unique opportunity to compare how the diverse behavior between the two periods affected the air quality in a school environment, it was possible to verify that simple actions that contribute to the exchange of air through natural ventilation can significantly increase the healthiness of the environment.

**Keywords:** Air quality, Polluents, COVID-19, Education, Health and cognition.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AURN	Automatic Urban and Rural Network
BAM	Beta Attenuation Monitor
CDPC	Contour Detection Particle Counting (Contagem de partículas para detecção de contorno)
CEN	European Standardization Organization
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CO	Monóxido de Carbono
CPV	Coeficiente de Pessoas por Volume
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CPV	Coeficiente de Pessoas por Volume
DPOC	Doença pulmonar obstrutiva crônica
EPA	Environment Protection Agency
ESA	European Space Agency
EUA	Estados Unidos da América
FEM	Federal Equivalent Method
GMT	Greenwich Mean Time
hMC	Hamiltonian Monte Carlo
hP-GAN	Hypothesis Pruning Generative Adversarial Network
MMSE	Mini-Mental State Examination
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Norma Brasileira
NDIR	Non Dispersive InfraRed

NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NO <sub>2</sub>	Dioxido de Nitrogênio
NO <sub>x</sub>	óxidos de nitrogênio
NSHA	National Social Life, Health, and Aging Project
NTP	Network Time Protocol
O <sub>3</sub>	Dióxido de enxofre
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PM <sub>1</sub>	Material particulado de até 1 micrometro de diâmetro aerodinâmico
PM <sub>10</sub>	Material particulado de até 10 micrometro de diâmetro aerodinâmico
PM <sub>2.5</sub>	Material particulado de até 2.5 micrometro de diâmetro aerodinâmico
ppb	partes por bilhão
ppm	partes por milhão
PTH	Pin Throught Hole (terminal inserido no furo)
RTP	Research Triangle Park
SD	Desvio Padrão
SIMA	Sociedade Italiana de Medicina Ambiental
SMD	Surface Mounted Device (componente montado em superfície)
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio
TEOM	Tapered Element Oscillating Microbalance
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UR	Umidade relativa do ar
VOC	Volatile Organic Compounds (Compostos Orgânicos Voláteis)



## LISTA DE FIGURAS

1.1	Imagem tradicional da zona habitável - nem muito quente nem muito fria. ....	25
1.2	Ilustração de uma tempestade e o vento solar, o escudo que é criado pelo campo magnético da Terra e estudo com sondas para analisar como os elétrons interagem com as ondas no ambiente magnético da Terra .....	25
1.3	Desempenho em relação à concentração de CO <sub>2</sub> . ....	31
2.1	Crescimento da Internet das Coisas ( <i>Internet of Things, IoT</i> ) ao longo das últimas décadas. ....	39
2.2	Representação esquemática dos fatores e correlações dos possíveis impactos da qualidade do ar em escolas. ....	44
2.3	Comparação entre valores mínimo, médio e máximo para as concentrações de dióxido de carbono em salas de aula na Islândia, China e Suécia. ....	45
3.1	Protótipo iAQ+. ....	48
3.2	Configuração da sala de aula e gráfico em uma Segunda (abaixo esquerda) e em uma Terça-feira (abaixo direita) de CO <sub>2</sub> e ocupação ao longo do tempo. ....	48
3.3	Concentrações de dióxido de carbono em diferentes tempos. ....	49
3.4	Concentrações de dióxido de carbono em diferentes condições de uso da sala. ....	50
3.5	(a) A placa de circuito impresso (PCB) personalizada e seus componentes para os pacotes de sensores Plantower PMS3003. (b) Caixa elétrica contendo todos os componentes para amostragem externa. ....	52
3.6	Comparação das concentrações de massa de PM <sub>2.5</sub> agregadas por hora ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ).....	63
3.7	Sensores de material particulado de baixo custo e seus respectivos preços de venda nos Estados Unidos. ....	64
3.8	Nos sensores de dispersão de luz (também conhecidos como nefelômetros), a luz é emitida na câmara de medição. Se houver partículas presentes, a luz é refratada e coletada por um fotodiodo. ....	64
3.9	Design personalizado da armadilha de luz com um espelho para refletir a luz do LED do flash para a câmara de medição. ....	64
3.10	Telefone Galaxy S6 com protótipo do sensor FeinPhone. (b) Os módulos de encaixe foram impressos em 3D para prototipagem rápida. ....	65
3.11	Contagem de partículas para detecção de contorno (CDPC): As gravações originais (a) passam por subtração de fundo, desfoque e binarização antes que um algoritmo de detecção de contorno isole manchas contínuas, das quais todas com uma área que excede um limite predefinido são contadas (b). ....	65
3.12	Abordagem combinada: A saída do algoritmo de contagem de partículas (CDPC) é subsequentemente canalizada através da Poisson Particle Detection (PPD). Os gráficos foram deslocados para compensar o atraso de tempo causado pelo método de referência. Eles mostram uma concordância qualitativa muito boa com a fração de tamanho PM(10 <sub>2.5</sub> ) da referência, mostrada aqui para os sensores B005 (esquerda) e B001 (direita). ....	65
3.13	Locais dos monitores de qualidade do ar (Air Quality Monitors - AQM) implantados nas escolas A e B.....	66

3.14	Imagem da tabela de tempo de atividade dos sensores individuais por local e comparação com a estação de referência. Para o AQM B.1, o Alpha-sense OPC-N2 relatou um sinal aleatório. O Honeywell HPM115S0 estava operacional apenas para o AQM A.1. A tabela também apresenta algumas características dos diferentes locais de instalação. ....	66
3.15	Imagem da tabela de Característica dos sensores de PM utilizados no estudo. ....	67
3.16	Coeficientes médios de determinação ( $R^2$ ) para sensores SDS011 e PMS7003 em diferentes faixas de concentração para médias de 15 min, $n$ na caixa de texto dentro da barra indica o número de amostras usadas para o ajuste. ....	67
3.17	Coeficientes médios de determinação ( $R^2$ ) para sensores SDS011 e PMS7003 em diferentes faixas de concentração para médias de 1h, $n$ na caixa de texto dentro da barra indica o número de amostras usadas para o ajuste. ....	67
3.18	Sequências de calibração para sensores $O_3$ e $NO_2$ do nó AQMesh. ....	68
3.19	Ciclo diário de concentração médio de abril a setembro de 2015, para $NO$ (esquerda) e $PM_{10}$ (direita) pelo nó do sensor 688150 (azul) e o instrumento de referência (vermelho). As áreas sombreadas representam o intervalo de confiança de 95%. ....	68
3.20	A arquitetura do modelo proposto HP-GAN. A poda é realizada após a geração dos ramos por várias hipóteses. é proposto um único codificador, gerador e discriminador. Também são utilizadas várias redes de hipóteses adicionais coloridas em ciano. ....	68
4.1	Primeira pcb desenhada com montagem e detalhe do sensor de umidade e temperatura com ventilação forçada para troca de calor com o meio externo. ....	75
4.2	Placa de circuito impresso em sua última versão modificada, agora com o sensor de umidade e temperatura integrado e preso a um apêndice distante do restante da placa, com muita área de troca de calor. ....	76
4.3	Módulos com integração do sensor de VOC SGP30. ....	79
4.4	PMS5003, da Plantower, com exemplo de conexão com um NodeMCU ESP8266, podendo ser utilizada a mesma conexão para os modelos citados. ....	81
4.5	PMS7003, da Plantower, com exemplo de conexão com um NodeMCU ESP8266. ....	81
4.6	SPS30, da Sensirion na direita e a interface de conexão, possuindo tanto comunicação $I_2C$ quanto UART ....	82
4.7	Sensor MH-Z14A, com possibilidade de conexão através de cabos de 7 vias (pitch de 1,5mm), na imagem da esquerda ou para soldar os fios diretamente no módulo, imagem da direita. ....	83
4.8	Sensor MH-Z19 com diversas variações e formas de conexão, com pinos e cabo de 7 vias. ....	84
4.9	Sensor SCD30 da Sensirion, que possui integrado ao sensor de $CO_2$ os sensores de temperatura e umidade. ....	85
4.10	Considerações que devem ser observadas no projeto do monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar, como não expor a radiação solar direta ao sensor (a), projetar uma condição de fluxo de ar constante no sensor (Figuras (b) e (c)), conforme o guia de projeto. ....	87
4.11	Sensor de pressão atmosférica SPL06-001, da Goertek. ....	88
4.12	Desenho prévio para confecção caixa de condicionamento, base e tampa... ..	89

4.13	Estudo pré-confecção da caixa de acondicionamento com o auxílio de renderização, a fim de se obter mais informações através da percepção visual do equipamento final. Opções de fixação em paredes ou colunas (a). Opções com e sem o duto de circulação de ar (c) e (d). Opções com display (todas), para visualização de informações diretamente na caixa. ....	90
4.14	Montagens de sensores, placa, cabos de conexões entre sensores e placa e entre as partes da caixa, tampa e fundo.....	91
4.15	Nova versão de caixa, agora com as correções para a versão final, sendo que foi projetada de forma modular, podendo ter ou não alguns elementos, como duto externo para fixação futura de aquecimento do ar, placa para fixação por parafuso na parede e esta por encaixe na caixa e suportes para diferentes modelos de sensores, como PMS5003, PMS7003 ou SPS30. ....	92
4.16	.....	93
4.17	Diversos sensores da Sensirion, encapsulados para uso em solo ou expostos, ideal para que o fluxo de ar contínuo sobre o sensor seja atendidos.....	93
4.18	Projeto de caixa de acondicionamento. As imagens mostram como foi feito o estudo para a disposição dos elementos, peças de fixação e cabeamento a fim de atender as demandas do projeto específico. ....	94
4.19	Uso de impressão 3D para a confecção da caixa de acondicionamento. Figuras (a) e (b) com imagens de caixas montadas e Figuras (c) e (d) com as partes impressas inferior e superior separadas. Pode-se notar que os engates rápidos para os sensores foram mantidos, bem como o destaques rápidos para os sensores também. ....	95
4.20	Cabo de alimentação e programação para a placa Arduino Uno, na esquerda a ponteira com conector USB-A e na direita a ponteira com conector USB-B. ....	96
4.21	Fonte de alimentação para Arduino UNO, com plug P4 compatível. ....	96
4.22	Plug P4 fema, para fixação interna na caixa e encaixe externo para a fonte de energia. ....	97
4.23	Peça do prensa cabo (a), fixação do cabo de alimentação em barra de pinos da placa, através de parafuso (b), fixação do prensa cabo pelo lado interno (c) e lado externo (d) para a fixação do cabo na caixa, sem o risco de ao puxar ser desconectado da placa. ....	97
4.24	Antenas de comunicação com módulos simples, como ESP-01 (a), passando pelos NodeMCU ESP8266 (b), NodeMCU ESP32 (c) NodeMCU ESP32u (d) e ESP32-WROOM-32u (a ser integrada na placa).....	98
4.25	Tipos de antena de comunicação não impressas na ESP32 podem ser adicionadas para melhorar a comunicação Wi-Fi com a internet. Antenas do tipo fita (a), sólidas (b) e com uma montagem em uma caixa (c). ....	98
4.26	Estrutura de armazenamento dos dados.....	102
4.27	Estrutura de armazenamento dos dados dos dispositivos. ....	103
4.28	Dados agregados de cinco device_codes de Porto Alegre.....	103
4.29	Sensores de dióxido de carbono na Escola de Engenharia da UFRGS. ....	104
4.30	Mapa com indicadores de qualidade do ar. Ao clicar no ponto, abre-se uma janela com detalhes do que o device_sensor possui. ....	104
4.31	Mapa pequeno com destaque para o índice de qualidade do ar e histórico de média horária para as variáveis de sensor_code que o local possui.....	105
4.32	Imagem da direita com o mapa apresentado para os sensores de qualidade do ar de Porto Alegre e na esquerda o menu ofertado para os usuários. ....	106
4.33	Gráfico com múltiplos sensores com os valores de dióxido de carbono. ....	107
4.34	Gráfico com múltiplos sensores com os valores de dióxido de carbono. ....	108

4.35	Imagem aérea da escola utilizada para os testes, no município de São Leopoldo, RS. Prédio Principal com Ensino Médio e Ensino Fundamental Anos Finais (1), Ensino Fundamental Anos Iniciais (2), Educação Infantil (3) e Prédio da Biblioteca e salas de apoio (4). .....	109
4.36	Imagem do Google Earth, com visão em perspectiva da escola, mostrando a diferença de altitude entre os prédios, sendo que o prédio 3 está em um ponto elevado em relação aos demais. ....	110
4.37	Sala de aula da Educação Infantil (sala 115) em que foi instalada caixa com sensores. ....	110
4.38	Sala de aula (105) do Ensino Fundamental, Anos Iniciais em que foi instalada caixa com sensores. ....	111
4.39	Sala de aula (116) do Ensino Fundamental, Anos Finais em que foi instalada caixa com sensores. ....	112
4.40	Sala de aula (106) do Ensino Médio em que foi instalada caixa com sensores. ....	112
4.41	Sala da Robótica, destinada principalmente ao Ensino Fundamental, com frequência menor do Ensino Médio. . ....	113
4.42	Sala dos professores, com ocupação bastante irregular durante o período de testes. ....	114
5.1	Equipamento proposto com a montagem mais adequada para escolas. No canto superior esquerdo uma visão geral, no direito o destaque para o sensor MH-Z19 (dourado) e o sensor de temperatura e umidade externo (branco). Abaixo, canto inferior esquerdo a forma de fixar os cabos, ao lado uma antena externa para Wi-Fi e na direita a fonte de energia. ....	122
5.2	Placa de circuito impresso em sua última versão modificada, com o sensor de umidade e temperatura integrado e preso a um apêndice distante do restante da placa, com muita área de troca de calor, sendo um opção para maiores . Reprodução da Figura A.10.....	122
5.3	Caixa de condicionamento feita em impressão 3d para substituir a confecção por terceiros e reduzir custos. Reprodução da Figura B.4 .....	123
5.4	Visão geral da tela de visualização de dados com os sensores podendo ser selecionados no menu suspenso do canto superior direito. ....	129
5.6	Detalhamento de um gráfico de gráficos de CO <sub>2</sub> , com área de qualidade do ar coloridas, textos alusivos no eixo vertical da esquerda e valores de mínimo, máximo e médio por período selecionado. ....	129
5.5	Gráficos de séries temporais com a opção de seleção de qualquer período do banco de dados. Com a visão ao mesmo tempo de mais de uma variável é possível fazer a análises visuais também, além de numéricas. ....	130
5.7	Concentração de CO <sub>2</sub> por ambiente, média horária pré COVID-19 (2018-2019).Número de amostras 77.501 (2018-2019). ....	132
5.8	Temperatura por ambiente, média horária pré COVID-19.Número de amostras 77.501 (2018-2019). ....	133
5.9	Umidade relativa do ar por ambiente, média horária pré COVID-19. Número de amostras 77.501 (2018-2019). ....	134
5.10	Concentração de material particulado (PM <sub>10</sub> ) ambiente, média horária pré COVID-19. Número de amostras 77.501 (2018-2019). ....	135
5.11	Concentração de material particulado (PM <sub>2,5</sub> ) ambiente, média horária pré COVID-19. Número de amostras 77.501 (2018-2019). ....	135
5.12	Compostos Orgânicos Voláteis - VOC/TVOC (ppb) do ambiente, média horária pré COVID-19. Número de amostras 77.501 (2018-2019). ....	137

5.13	Concentração de CO <sub>2</sub> por ambiente, média horária pós COVID-19 (Sala 217 c/30 pessoas, Sala Prof. c/25 pessoas). Número de amostras: 216.376 (2021-2022).	138
5.14	Temperatura por ambiente, média horária pós COVID-19 (Sala 217 c/30 pessoas, Sala Prof. c/25 pessoas). Número de amostras: 216.376 (2021-2022).	138
5.15	Umidade relativa do ar por ambiente, média horária pós COVID-19 (Sala 217 c/30 pessoas, Sala Prof. c/25 pessoas). Número de amostras: 216.376 (2021-2022).	139
5.16	Agrupamento de dados pré e pós COVID-19 para as variáveis CO <sub>2</sub> , temperatura e umidade relativa do ar relativos a coleta na sala 106. Número de amostras 8989 (2018-2019) e 15.026 (2021-2022).	140
5.17	Agrupamento de dados pré e pós COVID-19 para as variáveis CO <sub>2</sub> , temperatura e umidade relativa do ar relativos a coleta na sala 115. Número de amostras 17.717 (2018-2019) e 14.338 (2021-2022).	141
5.18	Agrupamento de dados pré e pós COVID-19 para as variáveis CO <sub>2</sub> , temperatura e umidade relativa do ar relativos a coleta na sala 116. Número de amostras 5.708 (2018-2019) e 24.007 (2021-2022).	142
5.19	Agrupamento de dados pré e pós COVID-19 para as variáveis CO <sub>2</sub> , temperatura e umidade relativa do ar relativos a coleta na sala 105. Número de amostras 8.314 (2018-2019) e 121.584 (2021-2022).	143
5.20	Agrupamento de dados pré e pós COVID-19 para as variáveis CO <sub>2</sub> , temperatura e umidade relativa do ar relativos a coleta na sala 205, dos professores. Número de amostras 16.887 (2018-2019) e 22.861 (2021-2022).	144
5.21	Concentração de CO <sub>2</sub> da sala 116, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,17). Número de amostras 5.708 (2018-2019) e 24.007 (2021-2022).	145
5.22	Dióxido de carbono da sala 116, Pré COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 5.708 (2018-2019).	145
5.23	Dióxido de carbono da sala 116, Pós COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 24.007 (2021-2022).	146
5.24	Concentração de CO <sub>2</sub> da sala dos professores, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,14). Número de amostras 16.887 (2018-2019) e 22.861 (2021-2022).	146
5.25	Concentração de CO <sub>2</sub> da sala 106, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,34). Número de amostras: 8.989 (2018-2019). Número de amostras: 15.026 (2021-2022).	147
5.26	Dióxido de carbono da sala 106, Pré COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 8.989 (2018-2019).	147
5.27	Dióxido de carbono da sala 106, Pós COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 15.026 (2021-2022).	148

5.28	Concentração de CO <sub>2</sub> da sala 105, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,13). Número de amostras 8.314 (2018-2019) e 121.584 (2021-2022).	148
5.29	Dióxido de carbono da sala 105, Pré COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 8.314 (2018-2019).	149
5.30	Dióxido de carbono da sala 105, Pós COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 121.584 (2021-2022).	149
5.31	Concentração de CO <sub>2</sub> da sala 115, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,13). Número de amostras: 17.717 (2018-2019). Número de amostras: 14.338 (2021-2022).	150
5.32	Dióxido de carbono da sala 115, Pré COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 17.717 (2018-2019).	150
5.33	Dióxido de carbono da sala 115, Pós COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 14.338 (2021-2022).	151
5.34	Temperatura da sala 116, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,17). Número de amostras 5.708 (2018-2019) e 24.007 (2021-2022).	151
5.35	Temperatura da sala 106, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,34). Número de amostras 8989 (2018-2019) e 15.026 (2021-2022).	152
5.36	Temperatura da sala dos professores, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,14). Número de amostras 16.887 (2018-2019) e 22.861 (2021-2022).	152
5.37	Temperatura da sala 105, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,13). Número de amostras 8.314 (2018-2019) e 121.584 (2021-2022).	153
5.38	Temperatura da sala 115, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,13). Número de amostras 17.717 (2018-2019) e 14.338 (2021-2022).	153
5.39	Umidade relativa do ar da sala 116, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,17). Número de amostras 5.708 (2018-2019) e 24.007 (2021-2022).	154
5.40	Umidade relativa do ar da sala 106, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,34). Número de amostras 8989 (2018-2019) e 15.026 (2021-2022).	154
5.41	Umidade relativa do ar da sala dos professores, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,10). Número de amostras 16.887 (2018-2019) e 22.861 (2021-2022).	155
5.42	Umidade relativa do ar da sala 105, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,13). Número de amostras 8.314 (2018-2019) e 121.584 (2021-2022).	155
5.43	Umidade relativa do ar da sala 115, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,14). Número de amostras 17.717 (2018-2019) e 14.338 (2021-2022).	155
6.1	Concentração de CO <sub>2</sub> da sala 106, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,34).	157
6.2	Temperatura da sala 106, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,34).	157

A.1	Placa integrada Arduino Uno R3 .....	165
A.2	Mini protoboards para a integração de componentes sem solda. ....	165
A.3	Placa de integração com processador, memória e conectividade sem-fio ESP8266. ....	166
A.4	Placa de integração com processador, memória e conectividade sem-fio ESP8266. ....	167
A.5	NodeMCU + ESP32, com detalhamento da pinagem. ....	168
A.6	Placa de fenolite perfuradas, ou ilhadas. ....	169
A.7	Placa desenhada para confecção industrial personalizada. ....	169
A.8	Primeira pcb desenhada com montagem e detalhe do sensor de umidade e temperatura com ventilação forçada para troca de calor com o meio externo. ....	170
A.9	Primeira pcb desenhada com montagem e detalhe do sensor de umidade e temperatura com ventilação forçada para troca de calor com o meio externo. ....	171
A.10	Placa de circuito impresso em sua última versão modificada, agora com o sensor de umidade e temperatura integrado e preso a um apêndice distante do restante da placa, com muita área de troca de calor. ....	171
A.11	Módulos com integração do sensor de VOC SGP30, Fonte: Links .....	175
A.12	Sensor GP2Y1014AU0F na esquerda, legenda de pinagem no centro e de integração na direita.....	176
A.13	PMS5003, da Plantower, com exemplo de conexão com um NodeMCU ESP8266, podendo ser utilizada a mesma conexão para os modelos citados. ....	178
A.14	PMS7003, da Plantower, com exemplo de conexão com um NodeMCU ESP8266. ....	179
A.15	SPS30, da Sensirion na direita e a interface de conexão, possuindo tanto comunicação I <sub>2</sub> C quanto UART .....	180
A.16	Sensor MG811 montado sobre diversos módulos de empresas diferentes e nas imagens da direita os potenciômetros em azul, para a calibração. ....	181
A.17	Sensor MH-Z14A, com possibilidade de conexão através da cabos de 7 vias (pitch de 1,5mm), na imagem da esquerda ou para soldar os fios diretamente no módulo, imagem da direita. ....	183
A.18	Sensor MH-Z19 com diversas variações e formas de conexão, com pinos e cabo de 7 vias.....	184
A.19	Sensor SCD30 da Sensirion, que possui integrado ao sensor de CO <sub>2</sub> os sensores de temperatura e umidade. ....	185
A.20	Sensor DHT11, montado com um sensor capacitivo e um termistor, com uma proteção de plástico e uma montagem com uma placa Arduino e com uma montagem com uma NodeMCU com ESP8266. ....	186
A.21	Sensor DHT22/AM2302(a), montado com um sensor capacitivo e um ter- mistor(b), e com uma configuração de conexão com uma NodeMCU com ESP8266(c). ....	187
A.22	Sensor HTU21D (esquerda) e uma configuração de conexão com uma placa Arduino Uno (direita). ....	188
A.23	Sensor HDC1080, da Texas Instruments, com variações de montagem , em um módulo CJMCU1080 (a) e um GY-213 HDC1080 (b), ambos conectados a uma placa Arduino UNO .....	189
A.24	Sensor SHTC3, da Sensirion (a), possui uma curva de precisão tanto de temperatura (b) quanto de umidade relativa do ar (c) que atendem o pro- pósito de medição de variáveis ambientais, conforme o próprio manual. ....	190

A.25	Vista superior dos pinos de conexão (esquerda) e do circuito para aplicação (direita) do SHTC3, incluindo os elementos necessários como resistores e capacitores, conforme datasheet.....	191
A.26	Considerações que devem ser observadas no projeto do monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar, como não expor a radiação solar direta ao sensor (a), projetar uma condição de fluxo de ar constante no sensor (Figuras (b) e (c)), conforme o guia de projeto. Fonte: Design Guide V1, já citado. ....	191
A.27	Sensor de pressão atmosférica SPL06-001, da Goertek. ....	192
A.28	Caixas de passagem elétrica encontradas no mercado e que foram inicialmente utilizadas para o condicionamento. ....	193
A.29	Desenho prévio para confecção caixa de condicionamento, base e tampa. Autor: Autor.....	194
A.30	Estudo pré-confecção da caixa de condicionamento com o auxílio de renderização, a fim de se obter mais informações através da percepção visual do equipamento final. Opções de fixação em paredes ou colunas (a). Opções com e sem o duto de circulação de ar (c) e (d). Opções com display (todas), para visualização de informações diretamente na caixa. ....	194
A.31	Montagens de sensores, placa, cabos de conexões entre sensores e placa e entre as partes da caixa, tampa e fundo. ....	195
A.32	Nova versão de caixa, agora com as correções para a versão final, sendo que foi projetada de forma modular, podendo ter ou não alguns elementos, como duto externo para fixação futura de aquecimento do ar, placa para fixação por parafuso na parede e esta por encaixe na caixa e suportes para diferentes modelos de sensores, como PMS5003, PMS7003 ou SPS30. ....	197
B.1	Placa de integração para uso com NodeMCU ESP32. ....	199
B.2	Diversos sensores da Sensirion, encapsulados para uso em solo ou expostos, ideal para que o fluxo de ar contínuo sobre o sensor seja atendidos.....	199
B.3	Projeto de caixa de condicionamento. As imagens mostram como foi feito o estudo para a disposição dos elementos, peças de fixação e cabeamento a fim de atender as demandas do projeto específico. ....	200
B.4	Uso de impressão 3D para a confecção da caixa de condicionamento. Figuras (a) e (b) com imagens de caixas montadas e Figuras (c) e (d) com as partes impressas inferior e superior separadas. Pode-se notar que os engates rápidos para os sensores foram mantidos, bem como o destaques rápidos para os sensores também.....	201
B.5	Cabo de alimentação e programação para a placa Arduino Uno, na esquerda a ponteira com conector USB-A e na direita a ponteira com conector USB-B. ....	202
B.6	Fonte de alimentação para Arduino UNO, com plug P4 compatível. ....	202
B.7	Plug P4 fema, para fixação interna na caixa e encaixe externo para a fonte de energia.....	203
B.8	Peça do prensa cabo (a), fixação do cabo de alimentação em barra de pinos da placa, através de parafuso (b), fixação do prensa cabo pelo lado interno (c) e lado externo (d) para a fixação do cabo na caixa, sem o risco de ao puxar ser desconectado da placa. ....	203
B.9	Antenas de comunicação com módulos simples, como ESP-01 (a), passando pelos NodeMCU ESP8266 (b), NodeMCU ESP32 (c) NodeMCU ESP32u (d) e ESP32-WROOM-32u (a ser integrada na placa).....	204



B.10 Tipos de antena de comunicação não impressas na ESP32 podem ser adicionadas para melhorar a comunicação Wi-Fi com a internet. Antenas do tipo fita (a), sólidas (b) e com uma montagem em uma caixa (c). .....205

## LISTA DE TABELAS

1.1	Média concentração de PM <sub>2.5</sub> durante o experimento de vela acesa e apagada.....	30
2.1	Levantamento de características de estudos com foco em monitoramento de CO <sub>2</sub> . Fonte: Autor, adaptado de (ACKLEY, 2021).....	41
3.1	Principais características dos sensores de PM de baixo custo assistidos por ventilador usados no estudo. Preços levantados no momento da construção.	55
3.2	Os valores de PM <sub>2.5</sub> e PM <sub>10</sub> coletados por meio de sensores baseados em TEOM. A dimensão de cada amostra é de 24h para as dois tipos de PM.. ....	62
4.1	Associação entre poluente ou variável ambiental a ser monitorada e a técnica/sensor a ser utilizada. ....	77
4.2	Associação entre poluente ou variável ambiental a ser monitorada e a técnica/sensor a ser utilizada. ....	78
4.3	Tabela de tratamento inicial de variáveis, limites. ....	100
4.4	Tabela de distribuição de sensores pelas salas, níveis educacionais e prédios pré pandemia. ....	111
4.5	Tabela de distribuição de sensores pelas salas, níveis educacionais e prédios pós pandemia.....	113
4.6	Tabela de retorno as aulas por salas e níveis educacionais. *retorno parcial.	114
4.7	Tabela de ocupação por estudantes. antes da pandemia, de cada ambiente com sensores, com ocupação distinta em períodos e horários distintos. ....	114
4.8	Tabela de ocupação por estudantes. após a pandemia, de cada ambiente com sensores, com ocupação distinta em períodos e horários distintos. ....	115
4.9	Tabela de ocupação em relação aos turnos da semana, pré pandemia.....	115
4.10	Tabela de ocupação em relação aos turnos da semana, pós pandemia. ....	116
5.1	Custo médio dos componentes para a confecção própria do kit, com o sensor de temperatura e umidade conectado via cabo. Placa de circuito impresso e caixa de acondicionamento confeccionadas por terceiros. Todos os valores não consideram impostos. ....	123
5.2	Custo médio dos componentes para a confecção própria do kit, com o sensor de temperatura e umidade integrado na placa de circuito impresso. Placa de circuito impresso e caixa de acondicionamento confeccionadas por terceiros. Todos os valores não consideram impostos.....	124
5.3	Custo médio dos componentes para a confecção própria do kit, com o sensor de temperatura e umidade conectado via cabo. Com confecção própria da placa de circuito impresso e da caixa de acondicionamento em impressão 3D. Todos os valores não consideram impostos.....	125
5.4	Limites indicados de concentração de CO <sub>2</sub> . ....	132
5.5	Limites indicados para a temperatura. ....	134
5.6	Limites indicados para a umidade relativa do ar.....	134
5.7	Os valores de TVOC segundo as Diretrizes de Qualidade do ARr da OMS..	136
A.1	Associação entre poluente ou variável ambiental a ser monitorada e a técnica/sensor a ser utilizada. ....	173
A.2	Associação entre poluente ou variável ambiental a ser monitorada e a técnica/sensor a ser utilizada. ....	174

A.3	Formato de conexão dos pinos, nomenclatura comercial, distância entre pino e comprimento. ....	177
D.1	QUADRO I - POSSÍVEIS FONTES DE POLUENTES BIOLÓGICOS.....	209
D.2	QUADRO II - POSSÍVEIS FONTES DE POLUENTES QUÍMICOS.....	210
D.3	Estratégia de amostragem.....	214
D.4	Estratégia de amostragem.....	215
D.5	Estratégia de amostragem.....	216

## LISTA DE CÓDIGOS

5.1	Lista de bibliotecas utilizadas.....	125
5.2	Declarações de constantes e variáveis com reserva de memória.....	126
5.3	Descrição do bloco Setup.....	127
5.4	Descrição do bloco Loop.....	128

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>34</b>
<b>3 TRABALHOS CORRELATOS</b>	<b>47</b>
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>69</b>
4.1 HARDWARE COM FABRICAÇÃO INDUSTRIAL.....	73
4.1.1 Placa de aquisição de dados e microcontrolador .....	73
4.1.2 Sensores.....	75
4.1.2.1 Compostos Orgânicos Voláteis (VOC).....	77
4.1.2.2 Material particulado (PM).....	78
4.1.2.3 Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).....	82
4.1.2.4 Temperatura e Umidade .....	85
4.1.3 Caixa de condicionamento .....	88
4.2 HARDWARE COM FABRICAÇÃO EM LABORATÓRIO .....	91
4.3 ENERGIA.....	94
4.4 COMUNICAÇÃO .....	96
4.5 SOFTWARE .....	97
4.5.1 Firmware .....	98
4.5.2 Em nuvem .....	99
4.5.3 Visualização .....	102
4.6 PREPARARAÇÃO PARA TESTES.....	105
4.6.1 Infraestrutura local.....	105
4.6.1.1 Educação Infantil.....	106
4.6.1.2 Ensino Fundamental, Anos Iniciais .....	107
4.6.1.3 Ensino Fundamental, Anos Finais .....	107
4.6.1.4 Ensino Médio .....	107
4.6.1.5 Administrativo, apoio .....	108
4.7 PIVOTAMENTO APÓS COVID-19 .....	109
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>117</b>
5.1 ANALISAR OS FATORES AMBIENTAIS QUE PODEM AFETAR A SAÚDE E COGNIÇÃO.....	117
5.2 ANALISAR AS OPÇÕES DE HARDWARE DE BAIXO CUSTO EXISTENTES.....	119
5.3 PROJETAR E CONSTRUIR O EQUIPAMENTO.....	121
5.4 DESENVOLVER SISTEMAS CAPTURA, ANÁLISE E VISUALIZAÇÃO DADOS DO ITEM ANTERIOR.....	124
5.5 IMPLEMENTAR E TESTAR METODOLOGIA DE INSERÇÃO DOS EQUIPAMENTOS EM AMBIENTES EDUCACIONAIS DA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE .....	130
5.5.1 Análise de dados coletados pré COVID-19 .....	131
5.5.2 Análise de dados coletados pós COVID-19.....	137
5.6 COMPARAR OS DADOS COLETADOS PRÉ E PÓS PANDEMIA COVID-19.....	139
5.6.1 Análise de dados por dia da semana e ambiente.....	139

5.6.2	<b>Análise de dados por variável e ambiente.....</b>	<b>143</b>
5.6.2.1	<b>CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>144</b>
5.6.2.2	<b>Temperatura.....</b>	<b>151</b>
5.6.2.3	<b>Umidade relativa do ar.....</b>	<b>153</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS</b>	<b>156</b>
	<b>Referências</b>	<b>159</b>
	<b>APÊNDICE A — HARDWARE COM FABRICAÇÃO INDUSTRIAL</b>	<b>164</b>
A.1	<b>Placa de aquisição de dados e microcontrolador .....</b>	<b>164</b>
A.2	<b>Sensores .....</b>	<b>172</b>
A.2.1	<b>Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) .....</b>	<b>173</b>
A.2.2	<b>Material particulado (PM) .....</b>	<b>175</b>
A.2.3	<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) .....</b>	<b>181</b>
A.2.4	<b>Temperatura e Umidade.....</b>	<b>185</b>
A.3	<b>Caixa de condicionamento .....</b>	<b>193</b>
	<b>APÊNDICE B — HARDWARE COM FABRICAÇÃO EM LABORATÓRIO</b>	<b>198</b>
B.1	<b>ENERGIA.....</b>	<b>202</b>
B.2	<b>COMUNICAÇÃO .....</b>	<b>204</b>
B.3	<b>SOFTWARE .....</b>	<b>206</b>
	<b>APÊNDICE C — DEFINIÇÕES ANVISA</b>	<b>207</b>
	<b>APÊNDICE D — DEFINIÇÕES ANVISA, ORIENTAÇÃO TÉCNICA</b>	<b>209</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ar interno surgiu como uma ciência nos anos da década de 1970 em decorrência da crise de energia pós Segunda Guerra Mundial. Com o intuito de otimizar o consumo surgiram as edificações mais eficientes energeticamente, com áreas de troca de calor com o ambiente externo reduzidas e, conseqüentemente, com ambientes internos mais isolados, com menor perda de calor, mas com menor ventilação. O confinamento do ar interno faz com que a renovação do mesmo não seja tão eficiente como deveria e conseqüentemente os ocupantes dos prédios acabam por respirar um ar não puro como encontraria em uma ambiente externo. Este problema já é amplamente estudado e a Organização Mundial da Saúde definiu a Síndrome do Prédio Doente como “um conjunto de doenças causadas ou estimuladas pela poluição do ar em espaços fechados” (STRELING; COLLETT; RUMEL, 1991).

Segundo a enciclopédia Britannica<sup>1</sup>, poluição tem a seguinte definição: Poluição, também chamada de poluição ambiental, adição de qualquer substância (sólida, líquida ou gasosa) ou qualquer forma de energia (como calor, som ou radioatividade ) ao ambiente a uma taxa mais rápida do que pode ser dispersa, diluída, decomposta, reciclada ou armazenada de alguma forma inofensiva. Os principais tipos de poluição, geralmente classificados por meio ambiente, são poluição do ar, poluição da água e poluição do solo. A sociedade moderna também se preocupa com tipos específicos de poluentes, como poluição sonora, poluição luminosa e poluição plástica. Poluição de todos os tipos pode ter efeitos negativos sobre o meio ambiente e a vida selvagem e frequentemente afeta a saúde e o bem-estar humanos.

A partir do conceito de poluição e das características básicas de energia e composição da atmosfera, constata-se que a ocupação humana no planeta, em poucas centenas de anos, conseguiu modificar algo que levou milhares de anos para ser formado sem a nossa presença.

As formas pelas quais a poluição do ar pode afetar a função cognitiva é pouco compreendida, no que tange a forma como a poluição do ar interage com fatores sociais, emocionais e cognitivos, sendo ainda amplo campo para a pesquisa. Em estudo com o objetivo de examinar a associação entre a exposição a poluentes e idosos participantes do projeto National Social Life, Health, and Aging Project (NSHAP) (TALLON et al., 2017), associou a redução da função cognitiva com a exposição por longos períodos a

---

<sup>1</sup><https://www.britannica.com/search?query=pollution>

material particulado ( $PM_{2.5}$ )<sup>1</sup> e  $NO_2$  em coorte<sup>2</sup> de idosos norte americanos e, indivíduos que experimentaram derrame ou ansiedade elevada se mostraram mais suscetíveis aos efeitos de  $PM_{2.5}$  na cognição. Além disto, resultados da medição sugerem que o  $PM_{2.5}$  pode impactar a cognição através de caminhos relacionados aos distúrbios do humor.

Nos trabalhos de (LIU; LEWIS, 2014), (COSTA et al., 2014) e (LEE et al., 2017) são apresentadas evidências de que a poluição do ar causada por material particulado está diretamente associada a efeitos adversos no sistema nervoso de adultos. A Organização Mundial da Saúde (OMS) (World Health Organization, n.d.) possui diretrizes que recomendam limites de exposição diária e anual a partículas com diâmetro igual ou menor do que  $2,5\mu m$ , não devendo exceder  $25\mu g/m^3$  em um período de 24h e  $50\mu g/m^3$  anual. O que seria um ambiente ideal para vivermos? Quais as características do meio ambiente podem prejudicar ou nos auxiliar? Já que somos o maior causador de mudanças no ambiente em que vivemos, precisamos entender inicialmente como era o mundo quando aqui surgimos, teoricamente o melhor ambiente para nós.

Nos desenvolvemos como espécie *Homo sapiens* há cerca de 350 mil anos e, há cerca de 50 mil anos, adquirimos nosso comportamento moderno. Temos nossa origem na África, tendo nos espalhado por todo o planeta, adaptando-se a cada região de forma a suportar as condições adversas por elas ofertadas. As distintas regiões da Terra possuem origem nas próprias características do nosso planeta, seja em relação ao Sistema Solar ou relevo/clima de cada região.

Entender como conseguimos sobreviver neste planeta e, por enquanto, o único que sabemos conter vida, é importante para poder avaliarmos quais as condições ambientais nos favorecem e quais são prejudiciais. As características básicas do meio ambiente em que nos desenvolvemos são oriundas da própria constituição da Terra, de sua origem e transformação.

Ocupamos um lugar na chamada zona habitável do Sistema Solar, não sendo muito quente, nem muito fria, ideal para termos água em estado líquido (ver Figura 1.1), que é essencial para a vida.

Além da distância adequada em relação ao Sol, a Terra possui um campo magnético que a protege do bombardeio de partículas solares de altíssima potência, que seriam

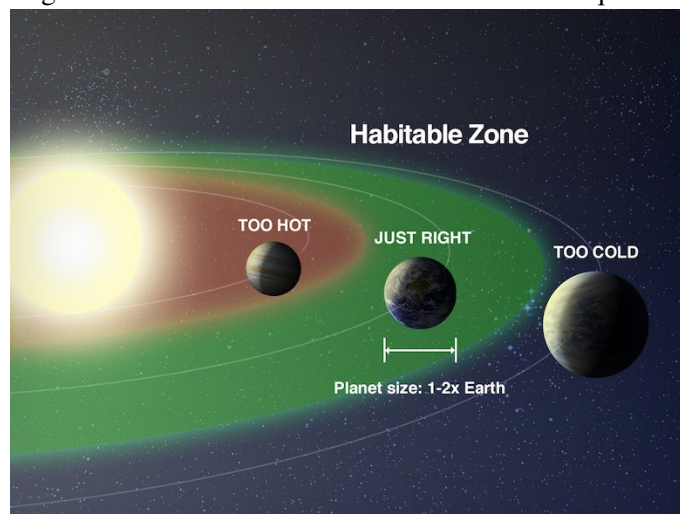
---

<sup>1</sup> Será utilizada a notação PM (particulate matter) para material particulado, com as siglas representativas  $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$  e  $PM_{10}$ , a fim de manter o padrão de identificação internacional para os poluentes.

<sup>2</sup> O estudo de coorte é um estudo observacional no qual os indivíduos são classificados (ou selecionados) segundo o status de exposição (expostos e não expostos), sendo seguidos para avaliar a incidência da doença em determinado período de tempo. O material particulado é classificado por seu diâmetro aerodinâmico médio, geralmente  $<10\mu m$  ( $PM_{10}$ ),  $<2,5\mu m$  ( $PM_{2.5}$ ) e  $<1\mu m$  ( $PM_1$ ), os dois últimos referidos como PM fino e ultrafino, respectivamente. Um PM de diâmetro  $<10\mu m$  pode ser inalado no trato respiratório.



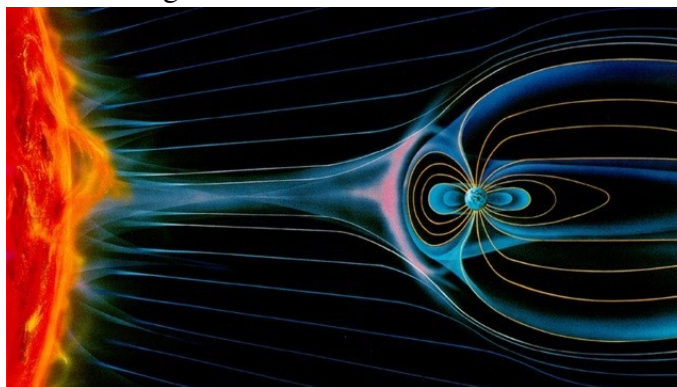
Figura 1.1: Imagem tradicional da zona habitável - nem muito quente nem muito fria.



Fonte: NASA <<https://exoplanets.nasa.gov/news/1583/oceans-beaches-cosmic-shorelines-our-changing-views-of-habitable-planets>>.

letais para seres orgânicos se atingissem a Terra. Além dele, temos a camada atmosférica que bloqueia radiações também prejudiciais, como a ultravioleta (ver Figura 1.2).

Figura 1.2: Ilustração de uma tempestade e o vento solar, o escudo que é criado pelo campo magnético da Terra e estudo com sondas para analisar como os elétrons interagem com as ondas no ambiente magnético da Terra .



Fonte: ESA <<https://sci.esa.int/web/cluster/-/61172-cluster-helps-solve-mysteries-of-g-eomagnetic-storms>>.

Além das questões térmica e de radiação, a camada atmosférica, considerando apenas o ar seco, possui uma composição que varia muito pouco na sua superfície, sendo principalmente<sup>1</sup>: nitrogênio (78,08%), oxigênio (20,9%), argônio (0,93%) e dióxido de carbono (0,04%). Esse oxigênio levou mais de 1,5 bilhão de anos para atingir a concentração atual, na qual nos desenvolvemos e surgimos como espécie. Este é outro aspecto que se deseja salientar nesta introdução.

Nos últimos 150 anos houve uma mudança significativa na concentração de alguns

<sup>1</sup>[https://pt.wikipedia.org/wiki/Atmosfera\\_da\\_Terra](https://pt.wikipedia.org/wiki/Atmosfera_da_Terra)

gases, como o dióxido de carbono, que cresce a uma taxa de 0,4% ao ano (Jardim 1996). Como já destacado, vivemos em um planeta com características singulares, que possibilitaram o desenvolvimento da vida como a conhecemos. Porém, as atividades decorrentes da nossa presença no planeta, já que somos a única espécie que até o momento conseguiu modificar o equilíbrio, direta ou indiretamente, nas substâncias ou energia no ambiente que ocupamos. Nós causamos poluição. Além de os poluentes que inserimos no meio ambiente provocarem um efeito negativo, podem prejudicar diretamente a saúde de cada ser humano do planeta.

Segundo (Braga et al. 1998), as grandes concentrações humanas produzem resíduos sólidos, líquidos e gasosos que compete a elas mesmas eliminar os mesmos, de forma adequada, para evitar a contaminação do meio ambiente. Os autores destacam que um dos elementos que mais sofre a intervenção humana é o ar, sendo que o primeiro episódio de aumento de números de mortes relacionadas com a poluição foi em 1930, com o aumento de indústrias na região de Meuse, Bélgica, sendo:

- 4 siderúrgicas
- 3 metalúrgicas
- 4 centrais de energia elétrica e suas minas de carvão
- 6 indústrias de cerâmica e vidro (utilizavam fornos a carvão ou gasogênio)
- 3 indústrias de cimento
- 3 indústrias de transformação química de minerais
- 1 carvoaria
- 1 fábrica de pólvora
- 1 fábrica de ácido sulfúrico
- 1 fábrica de adubos

Esta concentração se dava aproximadamente ao longo de 20 quilômetros de comprimento. No mês de dezembro, a ausência de ventos impediram a dispersão dos poluentes, sendo registrado um aumento no número de doenças respiratórias e um aumento no número de mortes, sendo que 60 foram contabilizadas após o início do evento. Em 1948, algo semelhante ocorreu em Donora, Pensilvânia (EUA), após uma ocorrência de inversão térmica que impediu a dispersão de poluentes do ar, 20 mortes foram contabilizadas, dez vezes maior do que a média para o período.

Foi analisado em estudo de 2018 (WANG et al., 2018) o efeito da exposição das concentrações de material particulado em curtos períodos na hospitalização por depres-

são. O estudo se desenvolveu utilizando o cruzamento de casos estratificados pelo tempo para identificar possíveis ligações entre os níveis ambientais de material particulado e as internações por depressão em 26 cidades chinesas. Os resultados apontaram que tanto o  $PM_{2.5}$  quanto o  $PM_{10}$  tiveram níveis associados com o número de internações por depressão. O estudo conclui que as exposições de curto prazo a elevadas concentrações de material particulado podem aumentar o risco de hospitalização por depressão, principalmente em idosos e pacientes com doenças cardiovasculares.

Dentre os estudos que demonstram a associação entre poluição do ar e diferentes condições médicas, destacam-se as doenças respiratórias e cardiovasculares. O estudo de revisão da literatura (BUOLI et al., 2018) fez uma compilação de 43 artigos sobre o tema, focados na relação entre os poluentes do ar e sua potencial influência na etiologia dos transtornos mentais. Um dos pontos fracos dos resultados globais dos artigos compilados é que diferentes períodos de tempo foram considerados para investigar os efeitos do poluente do ar na saúde mental (de um dia para anos), não havendo uma homogeneidade no tempo de exposição aos poluentes. A exposição a curto prazo ao poluente do ar deve causar um agravamento dos transtornos mentais existentes, enquanto exposições longas com alterações nos mecanismos epigenéticos devem ser responsáveis pelo aparecimento de distúrbios psiquiátricos ou idosos com declínio cognitivo.

Artigo com um estudo estatístico com os dados de 14 escolas primárias de Lisboa (CANHA et al., 2012), apontou algumas conclusões sobre as escolas:

- as salas de aula devem estar voltadas para ruas e não para pátios e não devem estar localizadas em porões;
- a densidade de alunos pode afetar o ambiente interno e deve ser limitada;
- materiais de madeira parecem ter vantagens como materiais de construção devido a uma menor entrada de contaminantes;
- fatores como ventilação, limpeza e uso de giz versus canetas de quadro branco, podem reduzir ou aumentar contaminantes específicos dentro das salas de aula.

As salas de aula voltadas para a rua parecem ter menores concentrações de ar de vários componentes do que aquelas voltadas para um pátio interno. Isso pode estar relacionado a problemas de ventilação, pois os pátios internos podem gerar menos movimento de ar e conseqüente acúmulo de alguns componentes.

O PM fino é respirável e pode atingir os bronquíolos e potencialmente os alvéolos, enquanto o PM ultrafino é capaz de atravessar a barreira ar-sangue e entrar na circulação.

Sabe-se hoje que a exposição à poluição do ar de PM é uma das principais causas de morbidade e mortalidade globalmente, sendo responsável por entre 4,2 milhões a 8,9 milhões de mortes por ano em todo o mundo, conforme artigo publicado em 2019 (BULOT et al., 2019). O mesmo artigo destaca que a exposição ao PM está associada ao aumento do risco de câncer de pulmão, asma, cardiopatia isquêmica e derrames, enquanto há evidências crescentes de associações com doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), diabetes mellitus tipo 2 e demência. Os autores destacam a origem do poluente a partir de uma variedade de fontes, sendo que a contribuição relativa e total dessas fontes varia espacial e temporalmente, sendo mais afetada pelas condições climáticas:

- 25% da poluição por PM<sub>2,5</sub> se origina do tráfego
- 22% de fontes não especificadas de origem humana
- 20% de queima de combustível doméstico
- 18% de queima de combustíveis naturais poeira e sal
- 15% de atividades industriais

A Organização Mundial da Saúde aponta em seu relatório de 2005 (ORGANIZATION et al., 2006) que os níveis de concentração de 20 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> e 10 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2,5</sub> são os níveis mais baixos nos quais se demonstrou que a mortalidade total por câncer de pulmão e cardiopulmonar aumenta com mais de 95% de confiança em resposta à exposição a longo prazo.

O mesmo relatório afirma que as evidências do impacto do material particulado na atmosfera são consistentes em relação aos efeitos adversos na saúde das populações urbanas expostas, tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento.

Além de material particulado, o estudo traz a análise em relação aos gases ozônio (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), tendo encontrado risco para a saúde em diversas cidades em países desenvolvidos para ozônio e material particulado. Também alerta para a crescente gama de efeitos adversos à saúde associados à poluição do ar, em especial ao material particulado. Estes novos efeitos foram evidenciados através de métodos refinados, como alterações na função pulmonar através de marcadores de inflamação. O nível de concentração para ozônio de 100 µg/m<sup>3</sup>, em médias de oito horas de medição, é o máximo indicado para um aumento entre 1 e 2% na mortalidade diária. Como exemplo, quando a concentração média para o mesmo período passa para 160 µg/m<sup>3</sup> o aumento na mortalidade diária pula para uma estimativa entre 3 e 5%.

No caso do dióxido de nitrogênio, os valores limites são de 40 µg/m<sup>3</sup> para a média

anual e  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para a média horária. Estudos epidemiológicos mostram que sintomas bronquíticos em crianças asmáticas aumentam com a concentração anual de dióxido de nitrogênio e que a redução no crescimento pulmonar em crianças está associada a comunidades com concentrações elevadas nas regiões urbanas da América do Norte e Europa.

Para o dióxido de enxofre, os valores limites são de  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para a média horária e  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para a média em um minuto. Estudos envolvendo exercícios asmáticos indicam mudanças na função respiratória após períodos de exposição menores do que 10 minutos para enxofre. Devido a exposição de curto período ser muito dependente da natureza da fonte de emissão e das condições meteorológicas, não é possível aplicar estimativas para limites de longos períodos.

Estudos sugerem a associação entre a redução do rendimento escolar com baixas taxas de ventilação ou altas concentrações de  $\text{CO}_2$ . Alguns apontam o decréscimo do rendimento com temperaturas muito acima dos  $20^\circ\text{C}$ . Outros estudos apontam para a associação entre a redução da performance cognitiva com o aumento de poluentes externos, tal como no estudo de (PETERSEN et al., 2016) que mostrou o efeito do aumento da taxa de ventilação, com redução de  $\text{CO}_2$ , na melhora do desempenho dos estudantes.

No trabalho de (SHEHAB; POPE, 2019) foram realizados os seguintes testes:

- Mini-Mental State Examination (MMSE)<sup>1</sup>;
- Stroop Color and Word Test<sup>2</sup>;
- Ruff 2 & 7<sup>3</sup>;

Foram realizados dois experimentos: O efeito de uma vela acesa na performance cognitiva: 30 assuntos foram testados neste experimento, sendo que as concentrações de poluentes medidos eram de material particulado  $\text{PM}_{2,5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) em testes comparativos com a vela acesa e com ela apagada. A Tabela 1.1 mostra a média das concentrações de material particulado durante o experimento com a vela acesa e com ela apagada.

O teste MMSE mostrou forte robustez estatística na redução de desempenho cognitivo após a exposição tanto para vela acesa quanto para deslocamentos externos (cami-

---

<sup>1</sup>O Mini-Mental State Examination (MMSE) ou teste de Folstein é um questionário de 30 itens que é usado extensivamente em ambientes clínicos e de investigação para medir a deficiência cognitiva. (<[https://en.wikipedia.org/wiki/Mini%E2%80%93Mental\\_State\\_Examination](https://en.wikipedia.org/wiki/Mini%E2%80%93Mental_State_Examination)>)

<sup>2</sup>O Stroop Color and Word Test (SCWT) é um teste neuropsicológico amplamente utilizado para avaliar a capacidade de inibir a interferência cognitiva que ocorre quando o processamento de uma característica específica do estímulo impede o processamento simultâneo de um segundo atributo de estímulo, conhecido como o Efeito Stroop. (<<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5388755/>>)

<sup>3</sup>O Teste de Atenção Selectiva Ruff 2 e 7, também conhecido como teste 2 e 7, é um teste de cancelamento de papel e lápis concebido para medir diferentes componentes de processos atencionais. O teste é composto por 20 blocos de letras e números nos quais os números 2 e 7 são alvos. (<https://openpsychologyjournal.com/VOLUME/12/PAGE/7/FULLTEXT>)

Tabela 1.1: Média concentração de PM<sub>2.5</sub> durante o experimento de vela acesa e apagada.

Exposure type	Means+- SD	item 13	candle
PM <sub>2.5</sub> Total Conc. ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Post Exposure	41.4+- (46.1)	27.0	on
PM <sub>2.5</sub> Total Conc. ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Pre Exposure	1.6+- (1.3)	1.2	off

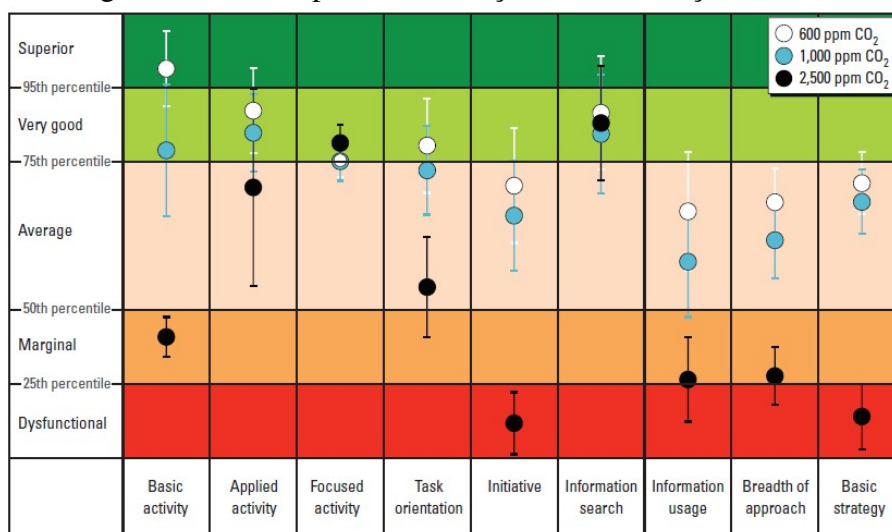
Fonte: (SHEHAB; POPE, 2019)

nhada, deslocamento de bicicleta ou deslocamento com veículos motorizados), comparado com ambientes internos. O trabalho conclui que a redução cognitiva se dá pelo fator comum a ambos, a exposição de curta duração ao material particulado. Para o teste Ruff 2 e 7 para atenção seletiva, o experimento para deslocamentos externos mostrou redução na rapidez de detecção automática. Já o teste relacionado a cores e palavras não apresentou significância estatística.

Uma investigação em Coimbra, Portugal, realizada com 51 escolas da educação básica (81 salas de aula), tanto do ambiente interno como externo, durante as 4 estações do ano. O levantamento revelou que 92% das escolas apresentaram valores de concentração de CO<sub>2</sub> acima da máxima legislada, sendo que as únicas fontes deste contaminante eram os próprios ocupantes através do seu metabolismo (FERREIRA; CARDOSO, 2013). Segundo (SATISH et al., 2012), o impacto do CO<sub>2</sub> em salas de aula, com três diferentes níveis de concentração, foi analisado através do desempenho dos estudantes em relação a atividades cotidianas, afetando diretamente a tomada de decisão. Sobre a tomada de decisão, que segue, mostra barras de erros que refletem a variabilidade entre indivíduos, a partir de diferentes condições de qualidade do ar em relação a concentrações de CO<sub>2</sub>, conforme mostra a Figura 1.3.

No trabalho de Bakó-Biró et al (CLEMETS-CROOME et al., 2008) foi realizado estudo na Inglaterra em 8 escolas primárias, mostrando que os níveis de concentração de CO<sub>2</sub> a que professores e crianças estavam expostos chegam a níveis de 5.000 ppm, muito acima do limite recomendado naquele país, uma concentração de 1.500 ppm. Foi constatada uma melhora dos testes de desempenho quando as taxas de ventilação eram trocadas de recirculação interna para troca de ar com o exterior das salas de aula, reduzindo os níveis de concentração de CO<sub>2</sub>. As melhoras foram de 15% no reconhecimento de palavras, 8% na memorização de figuras entre outras.

Estudo prévio a este trabalho, em escolas na região metropolitana de Porto Alegre, com a instalação de sensores de temperatura, umidade e PM mostraram índices de CO<sub>2</sub> acima dos valores recomendados (TAROUCO et al., 2017). Os resultados iniciais do mo-

Figura 1.3: Desempenho em relação à concentração de CO<sub>2</sub>.

Fonte: (SATISH et al., 2012).

Monitoramento mostram que sensores permitem identificar a abertura e fechamento de portas e janelas. O momento em que as salas estão sendo ocupadas por pessoas e quando estão sendo arejadas de alguma forma, mostrando a equalização de valores entre o ambiente interno e externo. Resultados do monitoramento mostraram que a concentração de dióxido de carbono em uma sala, quando cerca de 10 estudantes trabalhavam em ambiente fechado, ultrapassam o valor recomendado no Brasil, que é de 1000 ppm. Foi possível observar que após abrir janelas, permitindo a circulação de ar com o ambiente externo, o valor do dióxido de carbono diminuiu com rapidez, a despeito de permanecerem no ambiente a mesma quantidade de pessoas.

No Brasil poucos estudos abordam a temática da poluição e seus efeitos na saúde. Segundo (DAPPER; SPOHR; ZANINI, 2016) no Brasil os estudos epidemiológicos que analisam a associação de poluentes com problemas de saúde se concentram no Estado de São Paulo. Utilizando os dados de poluentes coletados pela CETESB, em relação aos seguintes poluentes: material particulado (PM), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), ozônio (O<sub>3</sub>), compostos orgânicos voláteis (VOC) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) foi realizado um levantamento sistemático dos estudos em relação a estes poluentes em São Paulo, não incluindo ambientes internos e, conseqüentemente, CO<sub>2</sub>.

Estudo de revisão sobre infecções hospitalares associadas à qualidade do ar em ambientes climatizados (SILVA, 2013), apontou como um desafio o cumprimento das normas de controle da qualidade do ar em hospitais, com uma ineficiência dos órgãos fiscalizadores.

Segundo estudo de saúde coletiva (SCHIRMER et al., 2011) doenças causadas por

contaminantes biológicos ocasionam reações alérgicas, cujos sintomas incluem espirros, olhos lacrimejantes, tosse, deficiência respiratória, letargia, febre e problemas digestivos, além de serem causadores de pneumonia, rinite e asma, sendo associadas as seguintes doenças: o Mal dos Legionários (bactéria gram-negativa do gênero *Legionella*); a febre do umidificador (exposição a toxinas de microrganismos); asma brônquica (inalação de aerossol biológico); pneumonite alérgica; pneumonia (bactérias como *Streptococcus pneumoniae*, *Mycoplasma pneumoniae*, *Staphylococcus aureus*, *Legionella* e *Haemophilus influenzae*, vírus e alguns tipos de fungos). E, ainda em relação a agentes orgânicos, devido ao produtor serem seres vivos, o dióxido de carbono à medida que aumentam os níveis de concentração no ambiente, “a pessoa sente como se não houvesse ar suficiente” e exposições contínuas podem conduzir à desmineralização dos ossos.

Dentre os trabalhos publicados, poucos possuem campanhas de meses, ou mesmo anos, sem conseguir acompanhar todas as estações do ano e, dentro de um ambiente educacional, o próprio calendário escolar com suas peculiaridades. A maioria dos trabalhos sugere que a saúde e a cognição são afetadas de diversas formas pela exposição a poluentes, reduzindo potencialmente o desempenho dos estudantes, além de afetar a sua saúde e a de toda a comunidade acadêmica. Diante disso coloca-se o seguinte problema de pesquisa: Como melhorar o desempenho e a saúde da comunidade acadêmica em função da presença de poluentes no meio educacional?

Em decorrência deste questionamento, apresentam-se as seguintes variações:

- Quais poluentes potencialmente afetam o rendimento educacional?
- Quais outros fatores ambientais podem afetar a saúde dos estudantes?
- Como medir a qualidade do ar?
- A quem se destinam as informações sobre a qualidade do ar em ambientes de aprendizagem?
- Como disponibilizar as informações de monitoramento para os interessados?
- De posse das informações, o que se pode fazer?

Os poluentes externos, decorrentes dos processos industriais, já são amplamente estudados. Estudos com material particulado mostram seus efeitos negativos na saúde, sendo os mesmos muitas vezes gerados pela poluição tipicamente urbana. Surge então um espaço para buscar o que não é tratado diretamente como um poluente externo, mas para ambientes fechados ele agora é visto como uma forma de controle da qualidade do ar, o dióxido de carbono. A sua medição poderá auxiliar na melhora do desempenho



educacional e da saúde da comunidade educacional? Com o uso de novas técnicas de medição da concentração de gases e partículas e, do avanço das formas de comunicação, emergiu a indagação feita que justificou este trabalho.

Este trabalho tem como objetivo principal criar um sistema de monitoramento de qualidade ar em ambientes educacionais visando a consequente redução do impacto de poluentes na saúde e cognição. A partir deste objetivo principal, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar os fatores ambientais que podem afetar a saúde e cognição;
- Analisar as opções de hardware de baixo custo para atender o item anterior;
- Projetar e construir o equipamento;
- Desenvolver sistemas de captura, análise e visualização de dados do item anterior;
- Implementar e testar metodologia de inserção dos equipamentos em ambientes educacionais da Região Metropolitana de Porto Alegre;
- Comparar os dados coletados pré e pós pandemia COVID-19.

As hipóteses que serão verificadas durante o estudo são:

- É possível implementar um sistema de monitoramento ambiental de baixo custo, com confiabilidade aceitável<sup>1</sup>, para o sistema público/privado educacional brasileiro;
- É possível desenvolver um sistema de monitoramento da qualidade do ar com foco específico em ambientes educacionais;

A organização deste trabalho se dá em capítulos, além desta introdução inicial. O segundo capítulo para analisar os fatores ambientais que afetam a cognição e a saúde em relação a legislação e órgãos reguladores. O terceiro capítulo é destinado ao levantamento de estudos e trabalhos correlatos ao proposto para este projeto.

A metodologia de implementação é apresentada no quarto capítulo. Os resultados prévios são mostrados no quinto capítulo e a conclusão no sexto.

---

<sup>1</sup>Considera-se aceitável um sistema que utilize sensores utilizados pela academia para o mesmo fim, como os que foram referenciados neste trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Em 2015 a ONU lançou a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável<sup>1</sup>. São 17 objetivos e 169 metas que buscam estimular entre 2015 e 2030 ações para "*acabar com a pobreza e a fome em todos os lugares; combater as desigualdades dentro e entre os países; construir sociedades pacíficas, justas e inclusivas; proteger os direitos humanos e promover a igualdade de gênero e o empoderamento das mulheres e meninas; e assegurar a proteção duradoura do planeta e seus recursos naturais.*"

O terceiro objetivo: Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades, tem em sua meta 3.9 "*Até 2030, reduzir substancialmente o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos, contaminação e poluição do ar e água do solo*" é utilizado como uma motivação para o presente trabalho, bem como vai ao encontro de outros estudos e trabalhos que estão sendo desenvolvidos ao redor do mundo em relação ao impacto que a redução da poluição interna e externa pode beneficiar toda a população.

Em 2020 a Cátedra UNESCO<sup>2</sup> de Educação para a Saúde e Desenvolvimento Sustentável e a Sociedade Italiana de Medicina Ambiental (SIMA), publicaram o seguinte artigo *Indoor air quality at school and students' performance: Recommendations of the UNESCO Chair on Health Education and Sustainable Development the Italian Society of Environmental Medicine (SIMA)* (PULIMENO et al., 2020). O documento aponta para diversos pontos que são negligenciados em relação à qualidade do ar interno, mas que afeta 64 milhões de estudantes e 4,5 milhões de professores na Europa. O documento destaca que os fatores básicos que determinam se o microclima na escola é saudável ou não são: nível de ventilação, temperatura e umidade. Aponta que um dos fatores que é diretamente correlacionado com a qualidade do ar interno é número de alunos em salas de aulas, sendo que uma criança com idade entre 7 e 9 anos gera 14 litros de CO<sub>2</sub> por hora e um adolescente de 15 anos de idade, em atividade física moderada, pode emitir até 85 litros de CO<sub>2</sub> por hora.

No Brasil a ocupação de estudantes por sala de aula varia por faixa etária, a legislação estabelece limite máximo de 25 alunos por professor, durante os cinco primeiros anos do ensino fundamental; e de 35, nos quatro anos finais do ensino fundamental e no ensino médio. Em qualquer caso, a área das salas de aulas corresponderá a, no mínimo,

---

<sup>1</sup><https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>

<sup>2</sup>Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) - (acrônimo de United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)

1,50 m<sup>2</sup> (um e meio metro quadrado) por aluno. Ou seja, não há uma legislação que considere a variação da taxa de produção de CO<sub>2</sub> pelos estudantes conforme avançam da infância para a adolescência, podendo gerar um ambiente mais insalubre, sem que haja um desrespeito com a legislação.

O documento da Cátedra em conjunto com a SIMA, em sua conclusão, propõem recomendações dentre elas (total de 15 recomendações), seguem as recomendações relacionadas com o presente trabalho:

- I. Lotação das salas de aula deve ser evitada;
- II. Professores e colaboradores devem ser informados que a má qualidade do ar interno afeta tanto a saúde dos alunos quanto seu desempenho acadêmica;
- III. As salas de aula devem ser ventiladas adequadamente antes do início das aulas e durante cada intervalo. Para calcular o intervalo máximo entre cada mudança de ar (abertura de janelas), muitos fatores devem ser levados em consideração como o volume da sala, idade e quantidade de crianças na sala de aula, o número de horas gastas nas atividades e os tipos de atividades realizadas nas salas. É importante ressaltar que janelas basculantes não suprem todas as áreas da sala com ar fresco, portanto janelas e portas devem ser abertas simultaneamente para criar uma troca de ar completa;
- IV. As superfícies de carteiras e cadeiras, assim como os materiais escolares, devem ser limpas com panos molhados todas as manhãs. Deve ser levado em consideração que há evidências de que crianças desenvolvem sintomas alérgicos se as salas de aula forem limpas apenas às tardes, principalmente se aspiradores de pó não forem utilizados. Atenção particular deve ser dada na remoção de mofo ou focos de umidade. Além disso, ao limpar as salas de aula, as janelas devem ser abertas ou os sistemas de ventilação devem ser ligados para reduzir com eficiência as poeiras, particulados e concentrações de Radônio.
- V. A adoção de protocolos e medidas para monitorar a qualidade do ar interno deve ser promovida em todas as escolas;
- VI. Termostatos devem ser instalados em cada sala de aula para monitorar a temperatura (e possivelmente também unidade que deve ser de 45%-55%) e evitar superaquecimento ou ar seco. A instalação de desumidificadores (com manutenção adequada dos filtros) deve ser considerada, caso necessário.

- VII. Reformas nos prédios escolares devem ser promovidas sempre que possível, priorizando remoção de asbestos (apenas por empresas especializadas), e com atenção ao uso de tintas resistentes à água ou móveis que possam emitir moléculas nocivas (como tolueno, benzeno, xilenos, etil benzeno), assim como potenciais fontes de compostos fatais
- VIII. Monitoramento anual para verificar a concentração de Radônio e de material particulado  $PM_{2,5}/PM_{10}$ , com a supervisão de especialistas ou em colaboração com autoridades de saúde locais ou regionais;

As recomendações destacadas apontam para a necessidade de um sistema de monitoramento da qualidade do ar, de um sistema de comunicação da qualidade do ar para com os professores e funcionários e da necessidade da criação de protocolos relacionados à qualidade do ar interno. Cita ainda a necessidade de investigar periodicamente poluentes como material particulado, radônio, hidrocarbonetos aromáticos (tolueno, benzeno, xilenos, etil benzeno, . . .), VOCs (*volatile organic compounds*, compostos orgânicos voláteis) e monóxido de carbono. Em 2021 a OMS e UNESCO publicam guia para que escolas promovam saúde

A qualidade do ar ambiente é regulada de forma mais específica em países como os da Europa, América do Norte e Japão. No Brasil a regulação dos ambientes é preponderantemente afetada durante o projeto e fiscalização dos prédios que abrigarão as escolas, atendo-se muito às questões relacionadas com a taxa de ocupação por área, ventilação natural ou forçada e iluminação. Em uma unidade escolar estabelecida, a fiscalização em relação ao conforto térmico, iluminação e condições fitossanitárias inexistem por parte do poder público, sendo apenas reativa a denúncias de sindicatos de classes e da própria comunidade escolar.

A ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) detalha condições ideais para várias os poluentes externos e internos, sendo que os internos sofrem uma regulação apenas para a manutenção dos equipamentos de ventilação forçada, sendo que a regulação para o conforto térmico é dada por (destacado do APÊNDICE A):

- Os valores recomendáveis para os parâmetros físicos de temperatura, umidade, velocidade e taxa de renovação do ar e de grau de pureza do ar, deverão estar de acordo com a NBR 6401 - Instalações Centrais de Ar Condicionado para Conforto - Parâmetros Básicos de Projeto da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (TÉCNICAS; BRASIL, NO, 1995)

- a faixa recomendável de operação das Temperaturas de Bulbo Seco, nas condições internas para verão, deverá variar de 23°C a 26°C, com exceção de ambientes de arte que deverão operar entre 21°C e 23°C. A faixa máxima de operação deverá variar de 26,5°C a 27°C, com exceção das áreas de acesso que poderão operar até 28°C. A seleção da faixa depende da finalidade e do local da instalação. Para condições internas para inverno, a faixa recomendável de operação deverá variar de 20°C a 22°C.
- faixa recomendável de operação da Umidade Relativa, nas condições internas para verão, deverá variar de 40% a 65%, com exceção de ambientes de arte que deverão operar entre 40% e 55% durante todo o ano. O valor máximo de operação deverá ser de 65%, com exceção das áreas de acesso que poderão operar até 70%. A seleção da faixa depende da finalidade e do local da instalação. Para condições internas para inverno, a faixa recomendável de operação deverá variar de 35% a 65%.

É possível identificar que os parâmetros possuem a necessidade de se adaptarem ao que o ambiente externo oferece de condições de contorno para a sala de aula. Variações geográficas no Brasil fazem com tenhamos contrastes agudos, que necessitam de adaptações locais para cada local e período do ano, respeitando também as variações climáticas. Dois quadros são destacados pela legislação da ANVISA, que tratam dos seguintes poluentes:

- Quadro I, agentes biológicos:
  - Bactérias;
  - Fungos;
  - Protozoários;
  - Vírus;
  - Algas;
  - Pólen;
  - Artrópodes;
  - Animais.
- Quadro II, agentes químicos:
  - CO;
  - CO<sub>2</sub>;

- NO<sub>2</sub>;
- O<sub>3</sub>;
- Formaldeído;
- Material particulado;
- Fumo e tabaco;
- VOC;
- COS-V.

Sendo que esses dois quadros não possuem uma legislação adequada, que tenha, por exemplo, a punição para quem não cumprir com as recomendações de saúde a serem oferecidas aos ocupantes dos prédios, apenas traz o seguinte texto:

*Recomenda-se que sejam adotadas para fins de pesquisa e com o propósito de levantar dados sobre a realidade brasileira, assim como para avaliação e correção das situações encontradas, as possíveis fontes de poluentes informadas nos Quadros I e II.*

Ou seja, ainda estamos no campo da pesquisa, como se já não houvesse os argumentos necessários para que os proprietários dos edifícios insalubres fossem penalizados ou mesmo forçados a criarem as condições adequadas à saúde para sua ocupação.

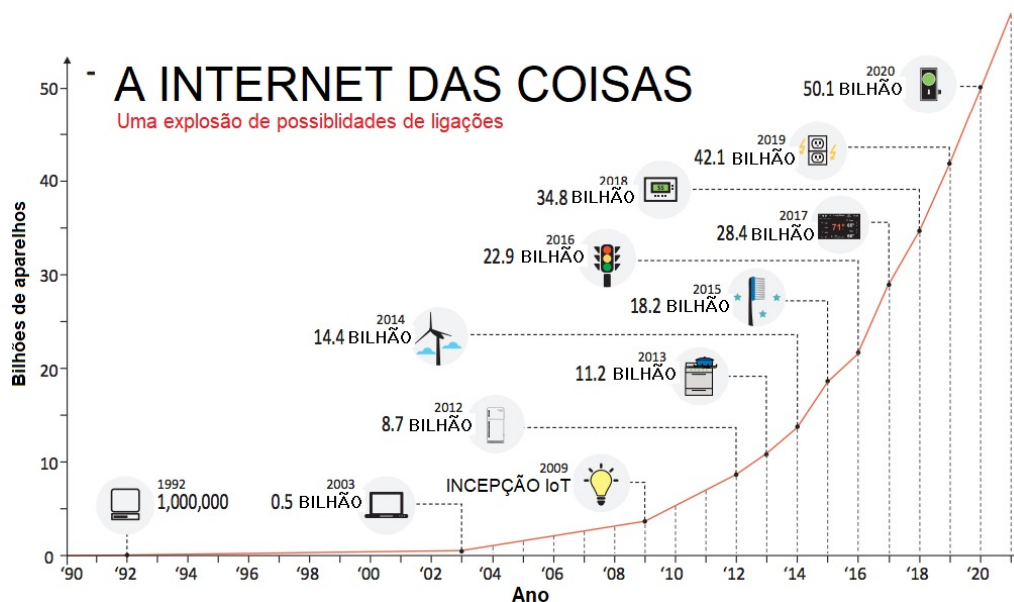
A literatura nos mostra que variáveis ambientais como iluminação, acústica, umidade, temperatura e poluentes são aspectos essenciais para a avaliação da qualidade do meio ambiente educacional, ou de qualquer outro prédio ocupado por diversas horas cotidianamente. O monitoramento da qualidade do ambiente requer equipamentos específicos, como para medir a intensidade luminosa utiliza-se um luxímetro ou para medir a umidade e temperatura lançar mão de termo-higrômetro.

Cada instrumento de medida das variáveis ambientais citadas evoluiu com o tempo, com o uso de novas tecnologias, novas normas de medição também foram sendo criadas ou adaptadas, por exemplo: a medição de material particulado surgiu com a medição da diferença de peso (e sua massa associada) entre um filtro de ar antes de ser exposto ao meio ambiente de depois de 24h em que o ar do ambiente passava por ele. Com isso, ao final de 24h se media o peso agregado (de poluentes) e tinha-se o valor para 24h de coleta.

Há algumas décadas, dataloggers, equipamentos capazes de armazenar digitalmente as leituras de instrumentos ou sensores durante várias horas, dias, semanas, foram incorporados, facilitando a coleta de dados de análises de dados. Nas últimas duas décadas a transmissão em tempo real, praticamente instantânea, da coleta de dados começou a ser incorporada nos instrumentos. Em especial na última décadas, com a proliferação

de plataformas IoT (Internet das Coisas), pequenos módulos de comunicação sem fio começaram a emergir de forma exponencial na sociedade. A Figura 2.1<sup>1</sup> mostra a evolução dos equipamentos baseados em IoT, ilustrando o crescimento exponencial da tecnologia, atingindo mais de 50 bilhões de equipamentos ao redor do mundo em 2020. Podem ser dispositivos que monitoram dados biométricos da saúde de um paciente, um medidor de atividade física, sensores em veículos que monitoram a pressão dos pneus, aparelhos domésticos que avisam quando uma carga de roupa termina ou quando algum alimento está acabando. No âmbito de smart cities, temos sistemas de controle de fluxo em estações de tratamento de água, monitoramento do volume de lixo em coletores públicos ou monitoramento de iluminação pública.

Figura 2.1: Crescimento da Internet das Coisas (*Internet of Things, IoT*) ao longo das últimas décadas.



Fonte: Adaptado de Smartbear<sup>1</sup>.

Esses equipamentos possuem um custo muito menor quando comparados aos smartphones e seus aplicativos. Também não dependem de um usuário para funcionarem, sem a necessidade da entrada de informações através do apertar de botões. Em muitos casos criam-se redes de sensores IoT, que se comunicam entre si, podendo fazer uso das informações uns dos outros a fim de acionarem atuadores, que podem aumentar ou diminuir a iluminação, fechar ou abrir janelas, ou mesmo avisar sobre a entrada de intrusos em locais não desejados.

Em publicação de 2013, da Royal Academy of Engineering, intitulada: SMART

<sup>1</sup><<https://smartbear.com/blog/internet-of-things-101/>>

BUILDINGS, People and Performance<sup>1</sup>, afirma que:

*“Avanços recentes na coleta e análise de dados estão abrindo novas possibilidades para a tecnologia de construção inteligente. Pela primeira vez, os sistemas de gerenciamento de edifícios têm a capacidade de aprender e até mesmo antecipar as necessidades e preferências de seus ocupantes por luz, temperatura e outros serviços – economizando energia por meio de fornecimento direcionado. A expansão e atualização contínuas das redes sem fio e os saltos no poder da computação significam que os projetistas de edifícios inteligentes de hoje possuem as ferramentas para usar dados para tornar o ambiente construído mais confortável e reduzir nossa pegada de carbono.”*

Segundo publicação<sup>2</sup> de 2020 da revista The Economist com o seguinte título: The Internet Of Things: Applications For Business, afirma que:

*“Empresas de telecomunicações estão compartilhando conhecimentos sobre como os produtos e serviços de IoT podem beneficiar os clientes empresariais. Muitas empresas estão relutantes em se envolver em IoT devido ao custo e complexidade e ao fato de não terem conhecimento sobre big data e análises. Aqueles com os recursos e habilidades se moverão rapidamente, não apenas para se habilitarem em IoT por meio da infraestrutura, mas também para serem educadores.”*

Em termos práticos, a instalação de sensores em edifícios pode enfrentar diversas dificuldades, como local com boa conexão de rede wireless, tomadas disponíveis nos locais apropriados para a instalação dos sensores, adulteração dos equipamentos por parte de alunos e/ou professores (por exemplo, para o uso das tomadas para carregar smartphones).

A ocupação por diferentes tipos de pessoas, em relação ao número, massa corporal, altura, troca de calor do corpo com o meio ambiente, metabolismo individual, entre outras questões também são condicionantes que podem influenciar de forma significativa a análise do monitoramento da qualidade do ambiente.

Além das questões relacionadas à ocupação dos prédios pelas pessoas, também há questões de sazonalidade das estações do ano, que proporcionam condições de contorno ambientais que variam ao longo do ano.

A escolha dos poluentes a serem analisados enfrentam questões relacionadas a diversos fatores, como a capacidade de investimento das escolas, fornecedores de equipamentos de qualidade, tipo de poluentes externos conhecidos, que podem infiltrar ar

---

<sup>1</sup><https://www.raeng.org.uk/publications/reports/raeng-smart-buildings-people-and-performance>

<sup>2</sup>[https://pages.eiu.com/rs/753-RIQ-438/images/18062020\\_CTE%20Report\\_Final.pdf](https://pages.eiu.com/rs/753-RIQ-438/images/18062020_CTE%20Report_Final.pdf)



interno das salas de aula, desejo das escolas de avaliarem seus ambientes, que podem retornar resultados positivos ou negativos. E, se forem negativos, o que fazer com estes dados? Há sempre o receio de que seja uma propaganda negativa para a escola.

Levantamento realizado por (ACKLEY, 2021), busca identificar um padrão entre os diversos estudos com a utilização de sensores de CO<sub>2</sub>. A Tabela 2.1 é uma adaptação para os estudos de interesse neste trabalho. Pode-se verificar que não há um padrão na localização dos sensores dentro do espaço a ser monitorado. A quantidade de sensores a serem utilizados variam de acordo com cada trabalho, sendo que não há uma possibilidade de correlacionar com número de ocupantes ou com área ou volume, pois questões geométricas das salas, quantidade de aberturas para ventilação natural ou número de condicionadores de ar também deveriam ser considerados para esta parametrização.

Tabela 2.1: Levantamento de características de estudos com foco em monitoramento de CO<sub>2</sub>. Fonte: Autor, adaptado de (ACKLEY, 2021).

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Sensores e duração</b>	<b>Posição dos sensores e nº de salas</b>	<b>Outras variáveis medidas</b>
Rosbach et al., 2013)	A ventilation intervention study in classrooms to improve indoor air quality.	1 CO <sub>2</sub> Sensor Log interval was 4 minutes for 3 weeks During Occupancy	A sensor was placed in the classroom wall at a height of 1.5 m from the floor.	Temperature and relative humidity.
Ferreira & Cardoso, 2014	Indoor air quality and health in schools.	1 CO <sub>2</sub> Sensor, 1 week, Measurements began about 2 hours after classroom occupancy.	A sensor was placed in the most central position in each classroom.	Temperature, relative humidity, CO, SO <sub>2</sub> , VOCs, and Outdoor air quality.

*Continua na próxima página*

Tabela 2.1 – *Continuação da página anterior*

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Sensores e duração</b>	<b>Posição dos sensores e nº de salas</b>	<b>Outras variáveis medidas</b>
Gao et al., 2014	Investigated indoor climate and window opening behaviour by pupils, as well as their perceptions and symptoms in classrooms with different types of ventilation systems.	1 CO <sub>2</sub> Sensor, 1 month, During occupancy	Sensors located centrally in the classroom at 1.6 - 1.8m above the floor so they could not be reached by pupils.	Temperature, relative humidity. Outdoor air quality
Jones & Kirby, 2012	Examination of natural ventilation strategy based on the use of a roof mounted split-duct Wind-catcher ventilator.	1 CO <sub>2</sub> Sensor, 5 days, Unoccupied Classroom	Sensors located centrally and placed at seated head height.	Temperature, relative humidity and ventilation rates
Schibuola et al., 2016	Investigating natural ventilation in school buildings.	1 CO <sub>2</sub> Sensor, 1 week, Occupied Classroom	Sensors centrally installed on a desk height of 80 cm from the floor.	Temperature and relative humidity
Zeiler & Boxem, 2009)	Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter.	14 classrooms	Sensors placed at a 1.1m height.	-
Bakó-Biró et al., 2012	Ventilation rates in schools.	3 sensors 20 classrooms	Sensors placed at a height of 1.1m in each room.	-

*Continua na próxima página*

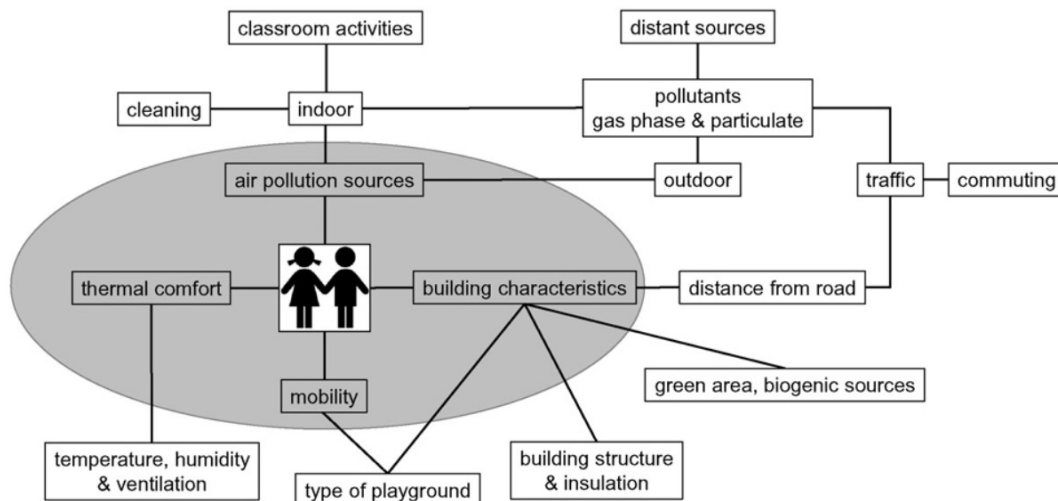
Tabela 2.1 – *Continuação da página anterior*

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Sensores e duração</b>	<b>Posição dos sensores e nº de salas</b>	<b>Outras variáveis medidas</b>
Grimsrud et al., 2006	Continuous measurements of air quality parameters in schools.	85 rooms in 8 school buildings	Sensors placed at the breathing level of a typical adult.	-
Griffiths & Eftekhari, 2008)	Control of CO <sub>2</sub> in a naturally ventilated classroom.	1 room	Sensors located at the seated height.	-
Godwin & Batterman, 2007	Indoor air quality in Michigan schools.	6 sensors, 64 rooms in 9 school buildings	Sensors located in a height of 1.2m in each room	-
Shendell et al., 2004	Association between classroom CO <sub>2</sub> concentrations and student attendance in Washington and Idaho.	400 rooms in 22 school buildings	Sensors located at a height of 1.5m in the middle of the classrooms.	-
Bennett et al., 2019	Sources of indoor air pollution at a New Zealand urban primary school.	One naturally ventilated classroom.	A single sensor positioned at a height of 1.1m.	Temperature, humidity, PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub>

As salas de aula das escolas são especialmente afetadas pelo movimento de poluentes do ar externo para o ar interno (SALTHAMMER et al., 2016). A Figura 2.2 mostra como as crianças podem ser afetadas pelo ambiente em que se encontram muitas horas diariamente. Geralmente acomodam um grande número de pessoas e, necessitam de uma ventilação adequada para manter baixos níveis de dióxido de carbono e outros poluentes,

a fim de proporcionarem um ambiente adequado para um bom desempenho.

Figura 2.2: Representação esquemática dos fatores e correlações dos possíveis impactos da qualidade do ar em escolas.



Fonte: (SALTHAMMER et al., 2016).

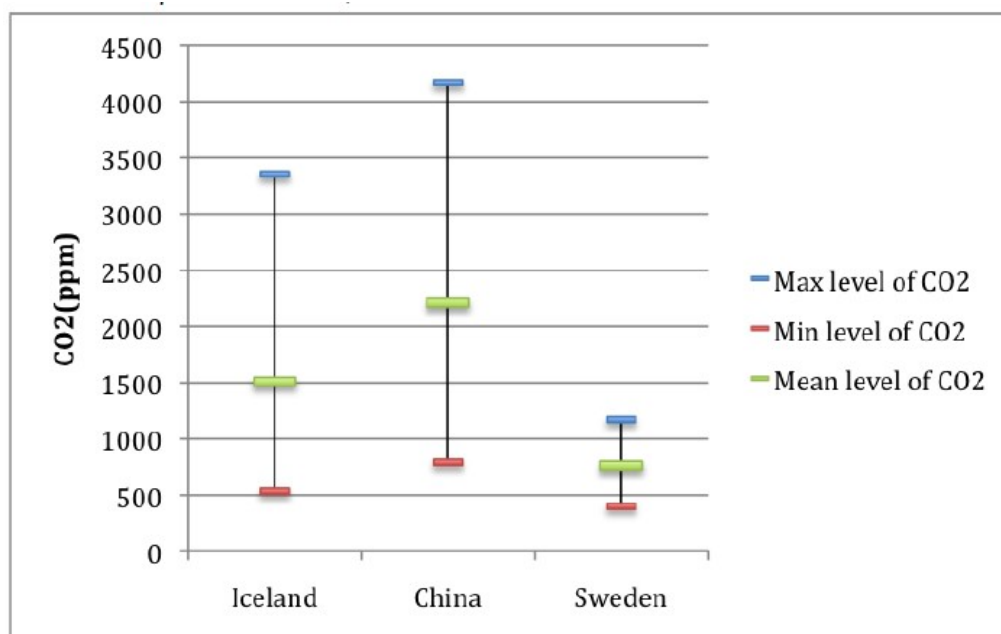
Estudo realizado em campus universitário em capu universitário brasileiro, quase a totalidade dos ambientes apresentou níveis de dióxido de carbono acima dos recomendados pelo pelo ministério da saúde, representando um risco para longas exposições de alunos e professores a estes ambientes (MESQUITA; ARAÚJO, 2006). Dentre as conclusões a abertura de de esquadrias e sistemas de ar condicionado que renovem o ar interno pelo externo se fazem ações indicadas como prioritárias, s para a melhoria da troca de ar entre os ambientes interno e externo, a fim de baixar as taxas de concentração de dióxido de carbono.

Uma investigação em Coimbra, Portugal, realizada com 51 escolas da educação básica (81 salas de aula), tanto do ambiente interno como externo, durante as 4 estações do ano. O trabalho apontou que 92% das escolas apresentaram níveis de concentração de CO<sub>2</sub> acima do indicado pela legislação portuguesa, sendo que as únicas fontes deste contaminante eram os próprios ocupantes através do seu metabolismo (FERREIRA; CARDOSO, 2013). A conclusão do estudo apontou para uma qualidade do ar de maneira geral, com apontamento para altas taxas de concentração de dióxido de carbono, com valores próximos de 2.000 ppm no período de outono/inverno, sugerindo a intervenção com melhora da ventilação.

O trabalho de (HELLSING, 2009) traz o levantamento de três países: Islândia, China e Suécia, com fonte de (ZHAO et al., 2006), mostrando os valores mínimo médio e máximo para as concentrações de dióxido de carbono em escolas daqueles países,

conforme mostra Figura 2.3. No estudo de correlações do artigo, o autor conclui que as taxas de renovação de ar recomendadas não são suficientes para altas taxas de ocupação das salas de aula e que há a necessidade de se aprimorar os sistemas de ventilação para reduzir os níveis de CO<sub>2</sub> nas escolas. Também destaca que há a necessidade de legislação clara sobre a qualidade do ar, com determinação de responsabilização para a prevenção e/ou redução da poluição de ar nas escolas.

Figura 2.3: Comparação entre valores mínimo, médio e máximo para as concentrações de dióxido de carbono em salas de aula na Islândia, China e Suécia.



Fonte: (HELLSING, 2009),(ZHAO et al., 2006).

Alguns estudos demonstram tentativas de manter as taxas de ventilação adequadas, com os níveis de CO<sub>2</sub> dentro dos padrões desejados. Estudo de (ROSBACH et al., 2013) mostra que a intervenção na ventilação da sala de aula é eficiente para concentrações de CO<sub>2</sub> em ambientes fechados. E que experimentos de campo não são comparáveis com experimentos de laboratório, podendo ser um desafio executar o estudo conforme planejado. Ainda assim o estudo apontou que os níveis de CO<sub>2</sub> nas salas de aula podem ser significativamente reduzidos com a instalação de um sistema de ventilação mecânica controlado por CO<sub>2</sub>.

A relação entre temperatura e umidade relativa do ar e contaminação microbiológica foi avaliado em estudo (CAIXETA et al., 2016) de monitoramento realizado em uma escola pública de Cuiabá, MT. O trabalho teve como objetivo monitorar mensalmente a qualidade do ar de uma escola da rede pública do município de Cuiabá, com base na Resolução n° 09, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, de 16 de janeiro de 2003. O

período de coleta dos dados foi de abril a dezembro de 2013 em horário escolar diurno. Foram selecionados pontos de amostragem sendo: sala de informática e 1 sala de aula refrigeradas por ar condicionado e 4 salas com uso de ventiladores. Além das salas de aula foram monitoradas áreas como secretaria, sala de informática, biblioteca, refeitório e área externa. A conclusão do trabalho evidencia a relação existente entre temperatura, umidade e contaminação microbiológica. Períodos de contaminação bacteriológica, exibiram altas taxas de temperatura e baixos valores de umidade. Períodos de alta incidência de fungos, também evidenciaram elevadas taxas de umidade e baixas temperaturas.

Análise com a utilização de séries temporais de poluição e associação com asma foi conduzido por Amâncio et al.(AMÂNCIO; NASCIMENTO, 2012) com o intuito de correlacionar o risco de internação de crianças por asma após a exposição a poluentes. Segundo o estudo, os poluentes atmosféricos associados a desfechos como doenças crônicas em crianças e aumentos no risco de morte são, principalmente, o material particulado ( $PM_{10}$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e ozônio ( $O_3$ ), sendo que estes, adicionando temperatura e umidade relativa do ar, foram as variáveis ambientais analisadas. Como conclusão, o trabalho identificou os poluentes  $PM_{10}$  e  $SO_2$  como associados a internações por asma.

### 3 TRABALHOS CORRELATOS

O uso de sensoriamento em ambientes educacionais têm sido explorados como uma estratégia com bons resultados no ensino de ciências, matemática e contribuído para a melhores resultados de aprendizagem (artigo). No estudo é descrita a experimentação científica do uso de monitores de dióxido de carbono para acompanhar as trocas deste gás entre seres vivos e o ambiente, no curso de licenciatura em Educação Básica da Escola Superior de Educação de Lisboa.

Em outro estudo da mesma instituição, agora trabalhando com sensores de dióxido de oxigênio e dióxido de carbono, foram realizadas atividades com o objetivo de:

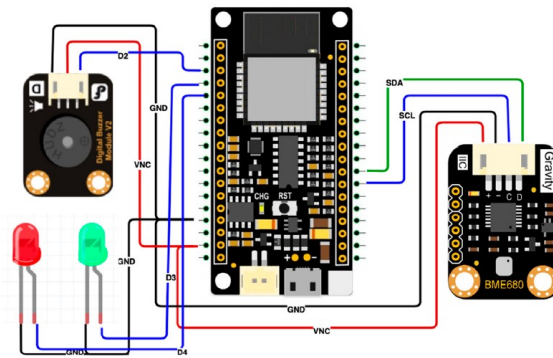
- avaliar o efeito da concentração dos gases para a diminuição da qualidade do ar interior e exterior;
- mensurar a concentração de dióxido de carbono, avaliando os níveis elevados, gerando uma necessidade de ser cuidada;
- avaliar a distribuição percentual dos gases no ar.

Um sistema dotado de sensores de temperatura, umidade relativa, pressão barométrica e indicador de qualidade do ar baseado em detecção de compostos orgânicos voláteis (VOC, *volatile organic compounds*), com supervisão qualitativa para cenários de escola e laboratório foi proposto por estudo realizado em 2019 ((MARQUES; PITARMA, 2019)). O hardware montado é ilustrado na Figura 3.1 e possui as seguintes características principais:

- FireBeetle ESP8266 é um módulo microcontrolador Tensilica L106 de 32 bits que suporta IEEE802.11 b/g/n WiFi (2,4 GHz - 2,5 GHz). Este módulo suporta uma entrada analógica de 10 bits, 10 entradas digitais que incorporam múltiplas interfaces como SPI, I<sub>2</sub>C, IR e I<sub>2</sub>S;
- O DFRobot Gravity BME680 é um sensor VOC ambiental I<sub>2</sub>C, sensor de temperatura, sensor de umidade e barômetro;
- O módulo de campainha DFRobot é um módulo de campainha que suporta uma tensão de entrada de 3,3 a 5,0 V;
- LEDs verde e vermelho para sinalização.

O iAQ+ suporta envia alertas em tempo hábil com a intenção de melhorar a qualidade do ar do ambiente e a saúde ocupacional. É capaz de modificar seu modo de funcionamento para laboratório e sala de aula.

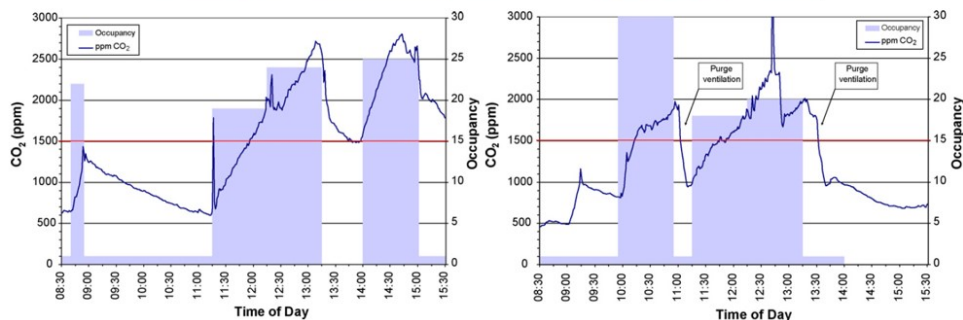
Figura 3.1: Protótipo iAQ+.



Fonte: (HELLSING, 2009),(MARQUES; PITARMA, 2019).

Trabalho de (GRIFFITHS; EFTEKHARI, 2008) mostra como a ventilação é eficiente para reduzir níveis de  $\text{CO}_2$  em em uma sala de aula de East London, Inglaterra. Os alunos que ocuparam as salas eram do Ensino Médio, com idades variando entre 12 a 16 anos, de gênero misto. A Figura 3.2 mostra a configuração da sala de aula e no gráfico como os níveis de concentração de  $\text{CO}_2$  baixam com uma ventilação e desocupação da sala de aula e retornam para valores elevados com a retomada da ocupação.

Figura 3.2: Configuração da sala de aula e gráfico em uma Segunda (abaixo esquerda) e em uma Terça-feira (abaixo direita) de  $\text{CO}_2$  e ocupação ao longo do tempo.



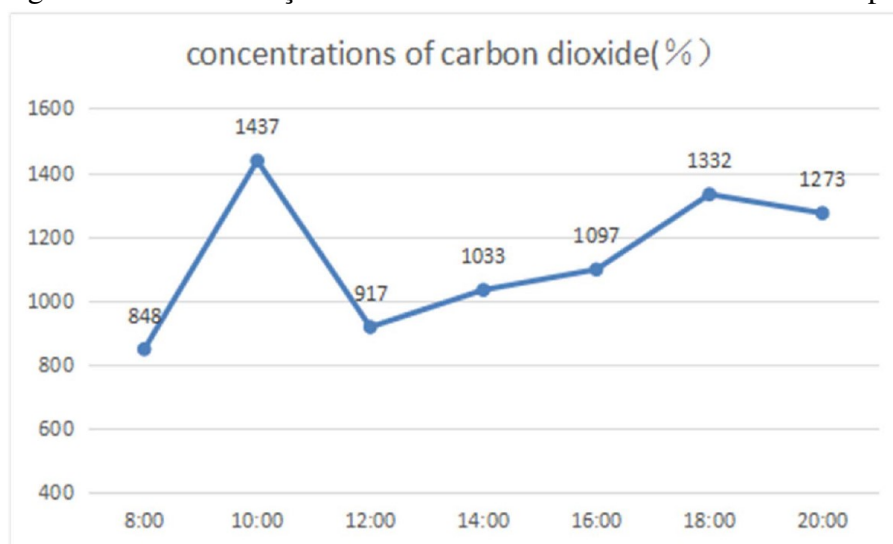
Fonte: (GRIFFITHS; EFTEKHARI, 2008).

O estudo realizou simulações para avaliar as possibilidades de ventilação que poderia otimizar a qualidade do ar. Demonstraram que o ambiente necessitava de uma ven-



tilação maior do que a esperada para manter a concentração de  $\text{CO}_2$  abaixo de 1500 ppm (regulamentação daquele país). Um tempo de limpeza de 10 min poderia reduzir a concentração de  $\text{CO}_2$  em 1000 ppm sem comprometer o conforto térmico, mas o modelo computacional desenvolvido mostrou que dois períodos de ventilação de limpeza não seriam suficientes isoladamente para manter um nível aceitável. Uma economia de cerca de £1000 por ano poderia ser obtida com a redução da ventilação lenta durante a noite. Outra afirmação de destaque é a de que os professores e os alunos controlam a ventilação nas salas de aula pelo conforto térmico e não pela qualidade do ar. Em estudo de (SHI et al., 2017) foi realizada a medição da qualidade do ar em duas partes. Na primeira parte, foram selecionadas duas salas de aula localizadas no lado ensolarado e no lado sombreado, respectivamente, no prédio de ensino de Bowen, no campus da Universidade Shandong Jianzhu, e testadas as variações de temperatura e umidade do ar com o tempo. A segunda parte concentrou-se nas concentrações de dióxido de carbono e salas de aula em diferentes camadas foram selecionadas para testar a tendência de mudança das concentrações de dióxido de carbono com o tempo. A Figura 3.3 mostra os dados coletados os dados das concentrações de dióxido de carbono em um ponto localizado no meio da sala de aula, no 5º andar do prédio de ensino de Bowen. Segundo os autores, os valores mais elevados 10 horas, 16:00 e às 20:00 eram mais altos devido a presença dos alunos da turma, a porta e as janelas estarem fechadas.

Figura 3.3: Concentrações de dióxido de carbono em diferentes tempos.

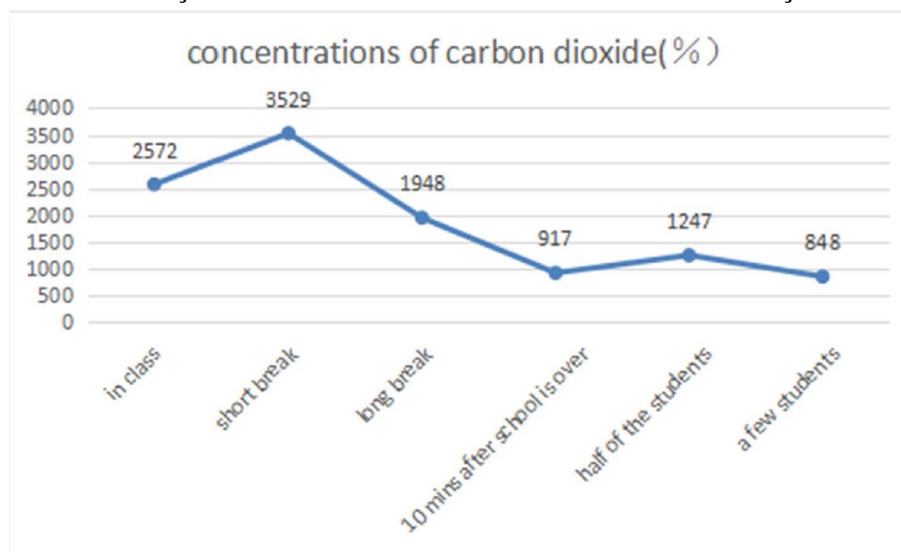


Fonte: (SHI et al., 2017).

Em outro exemplo do mesmo estudo, foram realizados os testes com coleta no meio da sala de aula, em diferentes condições de uso da mesma. Os dados das concentrações de dióxido de carbono em diferentes condições de serviço são plotados na Figura

## 3.4.

Figura 3.4: Concentrações de dióxido de carbono em diferentes condições de uso da sala.



Fonte: (SHI et al., 2017).

As técnicas de referência mais comuns para o monitoramento da PM são Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM) e Beta Attenuation Monitor (BAM), que medem propriedades do PM diretamente relacionadas à sua massa. Já os sensores de baixo custo disponíveis no mercado geralmente utilizam dispersão de luz e podem detectar partículas com diâmetros aerodinâmicos de  $0,3\mu\text{m}$  a  $10\mu\text{m}$ .

Conforme estudo de 2019 (KARAGULIAN et al., 2019) um crescente número de empresas está comercializando sensores de baixo custo capazes de monitorar a poluição do meio externo, sendo que um dos maiores benefícios é o aumento da cobertura espacial para monitorar o ar em cidades e locais remotos. Estes equipamentos custam de centenas de dólares a alguns milhares de dólares, sendo que a literatura científica relata a avaliação independente do desempenho de 110 equipamentos de baixo custo. Esses estudos apontam para uma instabilidade dos equipamentos, frequentemente afetados por condições atmosféricas e sensibilidade cruzada de compostos interferentes, que alteram o desempenho dos sensores.

O estudo apresentou métricas para os sensores de baixo custo em relação aos equipamentos de referência, sendo que alguns se poderiam ser considerados para o monitoramento de poluentes da qualidade do ar com um bom nível de concordância, representado por um coeficiente de determinação<sup>1</sup>  $R^2 > 0,75$  e inclinação próxima a 1,0.

<sup>1</sup>O coeficiente de determinação, também chamado de  $R^2$ , é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados. O  $R^2$  varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o  $R^2$ , mais explicativo é o modelo, melhor ele se ajusta à amostra.

O artigo destaca a possibilidade da versatilidade dos sensores de baixo custo para operar com vários poluentes, considerando o tratamento de dados de forma transparente. O estudo avaliou sensores de gás eletroquímicos, que medem a corrente de elétrons em uma reação de redução-oxidação, também conhecida como redox.

Também foram avaliados para gases com sensores baseados em semicondutores de metal-óxido (CMOS - *complementary metal-oxide-semiconductor*), que medem a condutância de cargas no material semicondutor de espécies que sofrem redução ou oxidação com oxigênio reativo. A função de calibração é configurada geralmente com uma estação de referência e são introduzidos vieses para o uso em outros locais com condições de composição do ar e meteorológicas diferentes.

Para os sensores de material particulado, sensores ópticos que medem a dispersão da luz, sendo que essa dispersão é relacionada com a concentração de massa. Essa técnica é fortemente afetada pela umidade, índice de reflexão e composição das partículas sendo necessário considerar que esses fatores variam em relação ao local e sazonalidade.

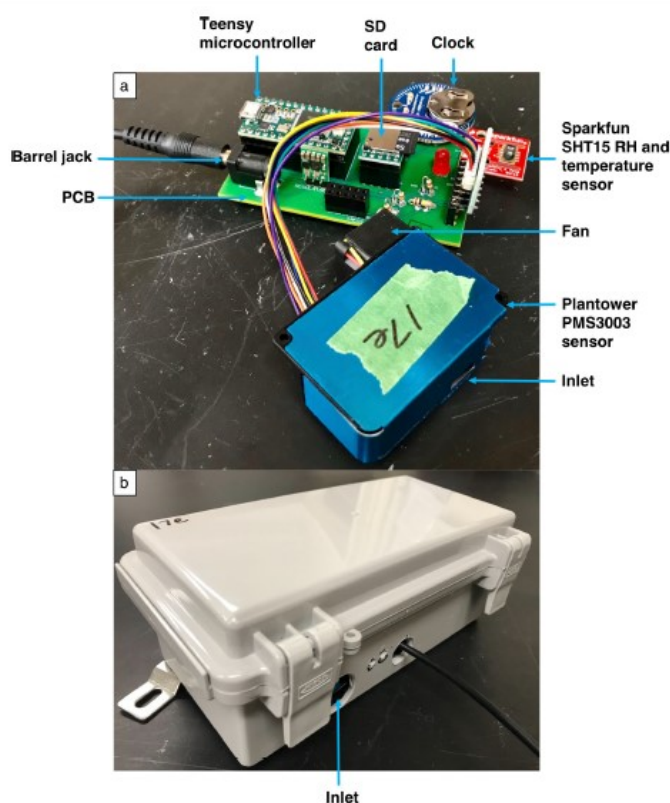
Em um trabalho de avaliação de desempenho para baixas e altas concentrações de material particulado (ZHENG et al., 2018), foi realizado estudo com sensores ópticos para medições de PM<sub>2.5</sub> com integração temporal para 1min, 1h, 6h, 12h e 24h. A montagem pode ser visualizada na Figura 3.5.

Foram utilizados os seguintes sensores e componentes, mostrados na Figura 3.4:

- Sensor de material particulado da Plantower PMS3003 (dimensões: 5,0cm de comprimento, 4,3cm de largura e 2,1cm de altura; peso: 40g);
- Sensor de umidade e temperatura da Sparkfun SHT15;
- Microcontrolador Teensy 3.2 baseado em USB;
- Relógio de alta precisão ChronoDot v2.1;
- Adaptador de cartão microSD;
- Regulador de tensão Pololu 5V S7V7F5;
- Barra de conectores;
- LED simples de 5 mm;
- Placa de circuito impresso (PCB) personalizada.

Para proteger os sensores da chuva e da luz solar direta, todos os componentes foram alojados em uma caixa elétrica NEMA (National Electrical Manufacturers Association) de 20,50cm de comprimento e 9,95cm de largura, 6,70cm de altura e 363g de peso (Bud Industries NBF32306). A entrada do sensor Plantower foi alinhada com um

Figura 3.5: (a) A placa de circuito impresso (PCB) personalizada e seus componentes para os pacotes de sensores Plantower PMS3003. (b) Caixa elétrica contendo todos os componentes para amostragem externa.



Fonte: (ZHENG et al., 2018).

orifício na caixa elétrica para garantir um fluxo de ar irrestrito no sensor. O peso total foi estimado em 430g no total e alimentado continuamente alimentado por um carregador de parede USB de 5V 1A. Os custos totais dos componentes do equipamento foram avaliados em aproximadamente USD 210. Para informações sobre montagem e uso de dados: <http://dukearc.com>, último acesso: 23 de dezembro de 2019.

Foram realizados testes de coleta de dados em Durham e Research Triangle Park (RTP), NC, US, para baixas concentrações suburbanas. E, em Kanpur, Índia, para altas concentrações urbanas de material particulado, antes e depois das monções (ZHENG et al., 2018). Em Durham e Kanpur foram utilizados monitores ambientais de atenuação  $\beta$  (E-BAM) como referência. Para o Research Triangle Park foram comparados com três Federal Equivalent Methods (FEMs), sendo dois Teledyne modelo T640s e um Thermo Scientific 5030 Sharp. Os monitores de referência podem não ser ideais para testar sensores de material particulado em baixas concentrações, conforme destacado pelo trabalho:

- a redução de erro menos dramática ao longo dos tempos médios no Research Triangle Park contra o T640 de base óptica (de 27% para média de 1h até 9% para média

de 24h) do que em Durham (de 201% a 15% respectivamente);

- os erros foram baixos na Research Triangle Park do que na estação pós-moção de Kanpur (de 35% para 11%);
- as correlações T640 PMS3003 mais altas ( $R^2$  0.63) do que SHARP – PMS3003 ( $R^2 \geq 0.25$ ). Uma grande influência da umidade relativa foi encontrada no Research Triangle Park (1h umidade relativa =  $64 \pm 22\%$ ) devido à precisão relativamente alta das medições T640 que podem explicar até 30% da variação em 1min a 6h de medições PMS3003  $PM_{2.5}$ .

O estudo concluiu que os erros médios menores dos sensores PMS3003 localizados no Research Triangle Park (de 27% para média de 1h até 9% para média de 24 h) em relação aos demais locais (Duke: de 201% a 15%; Kanpur pré-moção: de 46% a 17%; Kanpur pós-moção: de 35% a 11%) destaca o papel crítico da precisão dos instrumentos de referência para este tipo de análise (T640:  $\pm 0.5 \mu g m^3$  para 1h; SHARP:  $\pm 2 \mu g m^3$  para 24 h, melhor que do a precisão do E-BAM) interferem na avaliação do desempenho dos sensores em baixas concentrações. Entretanto, tempos médios mais longos (como 24 h) normalmente suavizam sinais ruidosos e resultam em níveis semelhantes de erro, indicando a viabilidade de calibrar sensores usando analisadores de referência abaixo do ideal. Os modelos de fator de correção de umidade relativa podem ser altamente específicos para cada localidade, sendo capazes de explicar até quase 30% da variação em 1min, 1h e 6 h de medições agregadas do sensor, podendo reduzir erros médios de 22% a 27% a aproximadamente 10%. As correções de temperatura foram relativamente pequenas e só puderam reduzir as incertezas em no máximo 7%.

O trabalho de (JOVAŠEVIĆ-STOJANOVIĆ et al., ) faz o comparativo de desempenho entre seis distintos sensores de material particulado que utilizam o método de dispersão da luz para medir a concentração (Figura 3.7). A primeira geração de sensores de baixo custo detectava a opacidade (a quantidade de luz não transmitida pela amostra), enquanto que os novos sensores detectam  $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$  e  $PM_{10}$ . No entanto, há uma falta e disparidade na literatura científica sobre procedimentos de avaliação e calibração de desempenho para sensores de baixo custo de material particulado, dificultando a avaliação da qualidade dos dados obtidos em diferentes estudos.

O trabalho destaca a potencial aplicação dos sensores de baixo custo para a detecção de pontos de acesso de concentração de material particulado, principalmente para a aplicação móvel de pedestres, ciclistas, veículos ou drones. Sendo que as medições em movimento podem servir de informação para a confecção de mapas dinâmicos de

poluição de material particulado, buscando a identificação de pontos de acesso. Outro potencial apontado pelo trabalho é na agricultura, com a identificação do espalhamento de pesticidas aplicados na lavoura, com especial atenção para possíveis movimentos dos pesticidas na direção de dos trabalhadores. O uso poderia substituir a tradicional amostragem de espalhamento do pesticida por um sensoriamento em tempo real, associado com as condições climáticas a fim de otimizar o uso dos pesticidas com menor risco.

Outro trabalho recente de monitoramento em tempo real com baixo custo e mobilidade é o do FeinPhone (BUDDE et al., 2019), que busca realizar as partículas pelo método de espalhamento da luz utilizando o flash e a câmera de smartphones para fazer isso, com o acoplamento de um dispositivo impresso em 3D.

A Figura 3.8 mostra a forma como é realizada a contagem através do método de espalhamento da luz. A Figura 3.9 a forma como construída uma armadilha de luz para direcionar a luz entre o flash e a câmera do smartphone. Na Figura 3.10 o protótipo impresso e o design em 3D.

Para realizar a contagem de partículas, foi criado um algoritmo chamado de Contour Detection Particle Counting (CDPC) e tratamento das imagens através da biblioteca de computação visual OpenCV. O vídeo é processado com um algoritmo de subtração de segundo plano, uma vez que as imagens dos sensores personalizados são afetadas pela iluminação de fundo devido ao design imperfeito da armadilha de luz e à montagem manual dos sensores, conforme mostra a Figura 3.12.

O projeto mostrou que os dados coletados apresentam uma excelente correlação com a fração grossa inalável de partículas finas de poeira e podem capturar com sucesso seus níveis em condições realistas. Sugerem para trabalhos futuros, um projeto de armadilha de luz mais sofisticado, para reduzir a perda de informações na etapa de subtração em segundo plano e potencialmente estender os recursos de detecção para todo o espectro de tamanho de partícula.

O artigo publicado em 2019 (BULOT et al., 2019) traz a comparação entre quatro sensores de baixo custo de PM em ambiente urbano externo. A Tabela 3.1 mostra detalhes dos sensores.

Os sensores de PM de baixo custo selecionados pelos autores foram estudados antes, conforme citação do artigo, em outros 11 trabalhos, em análises de dados produzidos pelos sensores em um curto período de tempo (dias e/ou semanas). No estudo dos autores, foi avaliado o desempenho em campo de diferentes sensores de PM em duas escolas em Southampton, Reino Unido, durante mais de um ano (ver distribuição na Figura 3.13). O

Tabela 3.1: Principais características dos sensores de PM de baixo custo assistidos por ventilador usados no estudo. Preços levantados no momento da construção.

Model	Size (mm) (H×W×D)	Price (USD)	Detection range ( $\mu\text{m}$ )	Concent. range ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Declared Accuracy ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Sampling interval (s)	Part. count
Alphasense OPC-N2	60×64×75	443	0.38 to 17	0.01 to 1,500	Not known	1 to 10	Yes
Plantower PMS5003	38×21×50	28	0.3 to 10	0 to 500	$\pm 10$	1 to 10	Yes
Plantower PMS7003	37×12×48	38	0.3 to 10	0 to 500	$\pm 10$	1 to 10	Yes
Honeywell HPMA115S02	36×43×24	33	Not known	0 to 1,000	$\pm 15$	>6	No

Fonte: (BULOT et al., 2019)

objetivo foi avaliar a longo prazo:

- a capacidade dos sensores de produzir dados horários, informando sobre as tendências da poluição, com correlação com os instrumentos de referência;
- a necessidade de instalar vários sensores de baixo custo no mesmo local;
- a utilidade dos sensores para produzir informações espaciais sobre a poluição do ar;
- a capacidade desses sensores para detectar eventos de curta duração não detectados pelas estações da Automatic Urban and Rural Network (AURN).

Conforme os autores, (BULOT et al., 2019), foi o primeiro estudo a colocar múltiplos sensores de diferentes modelos em um ambiente de campo configurado como uma rede de sensores por um período prolongado (um ano) e compará-los entre si e com instrumentos de referência. Isso permitiu avaliar os efeitos de fatores externos, como poluição de fundo e condições meteorológicas, sobre o desempenho do sensor durante um ano inteiro de condições ambientais, além de estudar sua resposta a uma série de eventos de poluição de curta duração.

Os sensores de baixo custo selecionados eram controlados remotamente através de um Raspberry Pi, sendo suficientemente pequenos para serem implantados para aplicações móveis ou portáteis. Todos eles relatam concentrações de  $\text{PM}_{2.5}$  e  $\text{PM}_{10}$  em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . O Plantower PMS5003, o Plantower PMS7003 e o Alphasense OPC-N2 também relatam  $\text{PM}_1$ . Os sensores Plantower reivindicam uma eficiência de contagem de 98% para partículas de diâmetro  $0,5\mu\text{m}$  e 50% para diâmetro de  $0,3\mu\text{m}$ . Todos usam um intervalo de

amostragem  $< 10$  s. De acordo com os fabricantes, sua precisão está entre  $\pm 10-15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Para avaliar o impacto de fatores externos, os autores compararam o coeficiente de Pearson para cada sensor em relação à estação de referência, sendo que as principais variações do trabalho que possuem correlação com o presente trabalho foram extraídas e compiladas a seguir:

- **Mês:** As diferenças significativas observadas estão principalmente relacionadas a agosto (verão), reduzidas pelo AQM localizado na Escola B e, em particular, pelo AQM B.2, para o qual os três sensores que registram um pico notável de poluição, com um intervalo de 1 minuto entre a velocidade do vento de cada local sendo  $< 0,8\text{m/s}$ . Esses picos não foram registrados pela estação de referência ou pelos AQMs da Escola A. Dado que essas leituras estão presentes nos três AQM da Escola B, elas podem indicar uma fonte de poluição muito localizada, ilustrando a capacidade desses sensores de detectar locais altamente localizadas fontes de poluição. Os dois Plantowers não mostram uma queda no desempenho, mas o Alphasense OPC-N2 parece mostrar uma tendência para diminuir a correlação com os meses, embora não possam ser encontradas diferenças significativas entre o início e o final do estudo.
- **Quartil da concentração de fundo ( $\text{PM}_{2.5}$ ):** Todos os sensores mostraram correlação crescente com a estação de fundo, pois a poluição de fundo aumentou com os coeficientes de Pearson 0,6 para os Plantowers e 0,4 para o Alphasense OPC-N2 para poluição de fundo no quartil superior ( $17,8$  a  $77,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Esse valor caiu com a diminuição da poluição em todos os sensores, mas a queda foi mais acentuada no Alphasense OPC-N2, enquanto o menor coeficiente de Pearson estava na concentração de segundo plano no segundo quartil ( $8,2-11,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $p < 0,01$ ) vs quartil superior. Para os três sensores, o segundo quartil de  $\text{PM}_{2.5}$  de fundo mostrou uma correlação de Pearson significativamente menor do que o grupo mais alto.
- **Quartil de umidade relativa:** Os dois sensores Plantower apresentaram uma melhor correlação com a estação  $\text{PM}_{2.5}$  de referência nos quartis superiores de umidade relativa (76-98%). Para o Alphasense OPC-N2, não houve diferença significativa entre os diferentes quartis, enquanto a correlação caiu para o terceiro quartil. Em baixa umidade relativa do ar, também há mais variabilidade entre os locais ilustrados pela distribuição dos sensores, com o Alphasense OPC-N2 apresentando a mais ampla faixa de valores. Os dois sensores Plantower apresentam diferenças significativas entre o quartil superior e o primeiro e o segundo quartis.



- Direção do vento: Os dois sensores Plantower apresentam pouca variabilidade com a direção do vento. O Alphasense OPC-N2 possui coeficientes de correlação mais baixos para o vento de S, SO e O. Todas as diferenças significativas observadas envolvem pelo menos uma dessas direções e são mais pronunciadas para os sensores localizados na Escola B. É provável que as diferenças observadas resultem do efeito combinado de fatores ambientais. Essas direções são da costa e provavelmente estão sujeitas a menos fontes de poluição do que as direções vindas do interior.
- Quartil de temperatura: A correlação entre os sensores AQM e as leituras da estação de referência foi maior em temperaturas no segundo quartil (7,3-11,2°C). O Alphasense OPC-N2 mostrou uma queda na correlação para o primeiro e terceiro quartis e mostra mais variabilidade com a temperatura em comparação com os modelos Plantower. Por outro lado, os modelos Plantower mostram diferenças significativas entre seus quartis, mas com pouca variação de correlação.
- Efeitos combinados: Um modelo linear que prediz a concentração de fundo com mês, direção do vento, umidade relativa e temperatura deu um  $R^2$  ajustado estatisticamente significativo de 0,11. Um modelo linear incluindo apenas a direção do vento e os meses também obteve um  $R^2$  ajustado estatisticamente significativo de 0,11 ( $R^2$  ajustado de 0,07 quando se considera apenas os meses). As menores correlações ocorreram em agosto. A análise da direção do vento durante este mês mostrou que o vento soprava principalmente de SO, que sugerem uma fonte confundida de poluição do SO em agosto. Duas explicações possíveis para isso são os eventos de combustão local, em particular churrascos, queima de resíduos de jardins ou geração de PM, fazendo trabalhos na escola durante as férias de verão. A hipótese mais provável é a de queima de resíduos de jardins ou churrascos, considerando os momentos em que esses eventos acontecem após as 19 horas, durante um agosto particularmente quente.

A Figura 3.14 mostra uma tabela com a distribuição temporal de cada equipamento de teste e a estação de referência, além de algumas características em relação aos locais de instalação.

Segundo o estudo, todos os três sensores tenderam a relatar maiores concentrações de  $PM_{2.5}$  em comparação com a estação de referência, mas deve-se notar que os sensores registram concentrações a cada 1 - 10s, enquanto o TEOM registra médias horárias. Além disso, o TEOM amostra apenas metade do tempo em um ciclo de 12 minutos em um local de fundo, portanto, pode não detectar as mesmas variações temporais dos sensores

de baixo custo. Os sensores também podem ser mais suscetíveis a eventos locais de curta duração. A adequação para monitorar eventos altamente resolvidos espacialmente seria melhor avaliada em relação a um instrumento de nível de referência com a mesma frequência de medição e relatórios.

Como conclusão, os autores destacam a concordância geral nas leituras entre os quatro modelos de sensores testados, mostrando mais variabilidade em baixas concentrações de PM e podem ser afetados diferencialmente pela variação de temperatura e umidade, implicando na necessidade potencial de diferentes métodos de correção. Apesar desses problemas, esses sensores de baixo custo são considerados adequados para monitorar eventos de poluição de curta duração, especialmente quando combinados com dados de vento e podem fornecer informações úteis sobre a exposição pessoal à PM. Eles também podem ser adequados para relatar dados horários para produzir dados para informar à população. A variabilidade entre modelos sugere que eles não devem ser implantados individualmente, com a colocação de vários sensores também fornecendo redundância, facilitando a detecção de falhas/outlier e garantindo a cobertura total dos dados. Dada a futura caracterização, sensores de baixo custo podem ser um meio econômico para melhorar a resolução espacial do monitoramento de PM em redes urbanas.

Em artigo de 2018 (BADURA et al., 2018), o trabalho comparativo de quatro modelos de sensores ópticos de baixo custo de material particulado ( $PM_{2.5}$ ), sendo monitoramento tendo sido realizado por quase meio ano, de 21 de agosto de 2017 a 19 de fevereiro de 2018, em Wrocław (Polônia). O analisador de referência foi o TEOM 1400a e os modelos de baixo custo foram (detalhes na Figura 3.15):

- SDS011 (Nova Fitness);
- ZH03A (Winsen);
- PMS7003 (Plantower);
- PC-N2 (Alphasense).

Três unidades de cada modelo de sensor foram colocadas em uma caixa comum para comparar o desempenho do sensor sob as mesmas condições de medição. A reprodutibilidade entre as unidades do sensor foi avaliada com base no coeficiente de variação (CV). Os valores CV foram inferiores a 7% no caso dos sensores SDS011 e PMS7003 e de 20% nas unidades OPC-N2. O CV foi superior a 50% para o ZH03A, principalmente devido a mau funcionamento. As tendências das saídas dos sensores eram geralmente semelhantes aos dados da TEOM, mas uma superestimação significativa das concentrações

de  $PM_{2.5}$  foi observada para os dados brutos do sensor.

Foi observada uma alta relação linear entre TEOM e sensores para dados médios de 1 min, 15 min e 1 hora para os sensores:

- PMS7003 ( $R^2 \approx 0.83 - 0.89$ );
- SDS011 ( $R^2 \approx 0.79 - 0.86$ );
- ZH03A ( $R^2 \approx 0.74 - 0.81$ ).

Os valores de  $R^2$  para médias diárias estavam em:

- PMS7003  $\approx 0.91 - 0.93$ ;
- SDS011  $\approx 0.87 - 0.90$ ;
- ZH03A  $\approx 0.89$ ;
- OPC-N2  $\approx 0.53 - 0.69$  para dados diários e  $\approx 0.43 - 0.61$  para médias de tempo mais curtas).

O impacto do alto nível de umidade relativa foi observado nos dispositivos SDS011 e OPC-N2, sendo que uma superestimação clara das saídas foi observada acima de 80% de umidade relativa. As Figura 3.16 e 3.17 ilustram o comparativo de resultados dos dois sensores melhores avaliados no estudo.

Em trabalho de (CASTELL et al., 2017) as plataformas de poluição atmosférica de baixo custo, fáceis de usar e muito compactas permitem observações em alta resolução espacial em tempo quase real e oferece novas oportunidades para aprimorar simultaneamente os sistemas de monitoramento existentes, bem como envolver os cidadãos no monitoramento ambiental ativo. No entanto, os dados gerados por essas plataformas são geralmente de qualidade questionável. Foi realizada uma avaliação de 24 unidades idênticas de uma plataforma comercial de sensores de baixo custo em relação aos analisadores de referência CEN (European Standardization Organization), mostrando que o desempenho varia espacial e temporalmente, pois depende da composição atmosférica e das condições meteorológicas. O desempenho variou de unidade para unidade, tornando necessário examinar a qualidade dos dados individualmente. Em geral, faltam orientações sobre como testar esses nós de sensores e garantir um desempenho adequado. Em geral, embora as plataformas de baixo custo tenham apresentado baixa precisão para fins regulatórios ou de saúde, elas podem fornecer informações relativas e agregadas sobre a qualidade do ar observada.

O trabalho apresentou avaliação de desempenho da plataforma comercial AQMesh (monitoramento de  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ ,  $CO$ ,  $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$ ) em condições de laboratório e de

campo. A co-localização de 24 plataformas AQMesh idênticas no campo foi realizada durante 6 meses (abril a setembro de 2015). A campanha de campo incluiu o estudo dos nós sensores em diferentes estações de monitoramento, que foram afetadas pelo tráfego urbano e pelos níveis de poluentes no meio urbano.

As estações foram equipadas com analisadores de gases e PM aprovados pelo CEN. A estação em Kirkeveien com analisadores de CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> e PM. As estações de Manglerud e Åkebergveien com analisadores de NO<sub>x</sub> e PM. O CO foi medido por espectroscopia de infravermelho não dispersiva, o NO<sub>x</sub> foi medido por quimioluminescência e o O<sub>3</sub> foi medido por fotometria UV. O PM foi medido usando TEOM em Kirkeveien e Manglerud e por difração de Mie (medição óptica) com um Grimm 180 em Åkebergveien. Os sensores tiveram trabalho prévio de calibração contra estações de referência, afim de obterem os melhores resultados, frente a equipamentos não calibrados, aspecto muito significativo para obtenção de resultados mais fidedignos, exemplo de gráfico de calibração na Figura 3.18.

Conforme ilustra a Figura 3.20, os autores acreditam que há promissora perspectiva para sensores comerciais de baixo custo, com resultados mostrando que os sensores avaliados, como NO e PM<sub>10</sub>, já são capazes de oferecer informações grosseiras sobre a qualidade do ar, indicando se a qualidade do ar é boa, moderada ou se o ar está fortemente poluído. Esse tipo de informação pode ser adequado para aplicativos que visam conscientizar e/ou envolver a comunidade monitorando a qualidade do ar local, sem a mesma precisão que o monitoramento científico ou regulatório.

Como indicação para futuros trabalhos, a implementação de uma potencial rede de sensores de baixo custo em um mapeamento de maior confiabilidade.

Em trabalho de (SMITH et al., 2019) mostra o uso da técnica de inteligência artificial de aprendizado de máquina probabilístico em uma rede de poluição do ar, com o poder de mitigar algumas das restrições técnicas para redes de sensores. Foram modeladas a calibração para sensores individuais como distribuições ou processos Gaussianos ao longo do tempo.

Foi considerada a implantação de uma rede de monitoramento da poluição do ar em Kampala, uma cidade do leste da África. Mesmo Kampala tendo uma das maiores concentrações de material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) da África, não há programa para monitorar a poluição do ar na cidade devido ao alto custo do equipamento necessário. Existem dispositivos de menor custo, mas eles não fornecem, por si só, a precisão necessária. O estudo de caso, a rede de sensores de Kampala consiste em grande parte de contadores

ópticos de partículas de baixo custo.

Foi utilizada uma abordagem numérica (usando Hamiltonian Monte Carlo, HMC) para permitir que o modelo seja ajustado rapidamente, sendo vários sensores localizados (um de referência e vários de baixo custo). Um modelo de regressão de processo gaussiano co-regionalizado para modelar, usando uma matriz de co-regionalização de classificação  $aa^T$ , com o peso do instrumento de referência  $a_1 = 1$  fixo. Segundo os resultados dos autores, a abordagem de modelagem probabilística descrita para esse problema parece ser relativamente robusta e direta, sendo o principal problema quando a calibração é encadeada. Próximos estudos demandam a implantação de instrumentos de referência e testar esse método com os moto-táxis, serviço de táxi realizado com motos no local, e os sensores ópticos de baixo custo já existentes. Segundo os autores, alguns problemas ainda precisam ser resolvidos, conforme listagem do artigo transcrita a seguir:

1. Viés de coleta de dados. Especificamente, o foco na poluição do ar ambiente (ao ar livre). Os papéis de gênero na sociedade significam que esta é uma questão de gênero. Estamos trabalhando ativamente com parceiros para incorporar um elemento interno ao monitoramento.
2. Custo de oportunidade da implementação. O dinheiro e o tempo gastos no desenvolvimento e implantação da rede podem ter sido mais bem gastos em outros problemas de desenvolvimento. No entanto, o treinamento e a orientação são fundamentais para o projeto, com a intenção de que o grupo de pesquisa atinja um padrão internacional de pesquisa. Esses benefícios indiretos podem até exceder os resultados diretos, para projetos de pesquisa, onde apoiar o ensino superior é um resultado importante do desenvolvimento.
3. Sustentabilidade. Quanto tempo durará o sistema? Custo a longo prazo? Quem pode mantê-lo?
4. Os sensores móveis são montados em táxis de moto. As rotas que eles seguem podem conter dados privados. Estamos desenvolvendo métodos diferenciais de privacidade para ocultar isso nas previsões.
5. (Ab)uso desses resultados. Quem usará os dados? É concebível que possa ser usado como uma razão ou desculpa para restringir uma atividade, como um cozimento com combustível sólido, do qual um grupo vulnerável depende. A alternativa é reter ou cancelar o monitoramento (que também pode ser antiético).

Tabela 3.2: Os valores de  $PM_{2.5}$  e  $PM_{10}$  coletados por meio de sensores baseados em TEOM. A dimensão de cada amostra é de 24h para as dois tipos de PM..

	Normal	Abnormal	Total
Number of sample	249	73	322

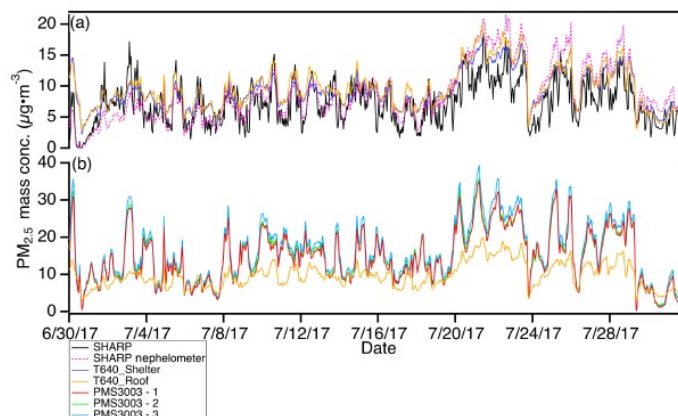
Fonte: (PARK; PARK; KIM, 2021)

O artigo de (PARK; PARK; KIM, 2021) tenta detectar os defeitos de manutenção dos instrumentos de referência TEOM, considerando terem um custo menor do que os BAM, propondo uma arquitetura chamada . Neste artigo, chamamos muitos tipos de mau funcionamento do sensor como anomalia, e nosso objetivo é detectar anomalias no sensor PM. Os autores propõem uma nova arquitetura nomeada de Hypothesis Pruning Generative Adversarial Network (HP-GAN) para detecção de anomalias. Métodos baseados em regressão, como SVM, codificador automático (AE) ou memória de longo prazo (LSTM) são soluções simples e o custo da preparação para o treinamento em aprendizado de máquina convencional ou o algoritmo de detecção de anomalia baseado em aprendizado profundo não é alto. Na Figura 3.20 é apresentada a arquitetura proposta .

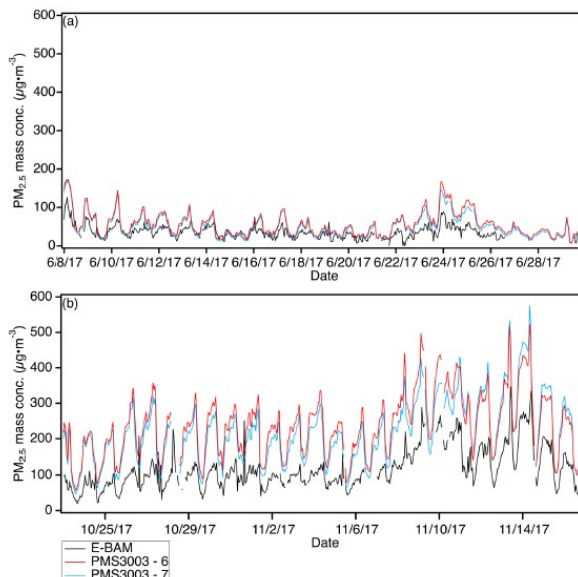
Os autores coletaram um conjunto de dados de PM de 12 pontos na Biblioteca Metropolitana de Jungang Daegu, Coréia. Para coletar dados, utilizaram o sensor baseado em TEOM e os sensores estão localizados em cada ponto de coleta. O conjunto de dados coletados para o experimento é mostrado na Tabela

Os resultados, segundo os autores, mostram um desempenho superior no comparativo a outros modelos, com erro quadrático médio melhor entre as arquiteturas inteiras. Concluindo que o modelo HP-GAN, construído com base em correspondência de vetores latentes e múltiplas hipóteses, é uma arquitetura de ponta para detecção de anomalias.

Figura 3.6: Comparação das concentrações de massa de  $PM_{2.5}$  agregadas por hora ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )



(a) Comparação das concentrações de massa de  $PM_{2.5}$  agregadas por hora ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) entre o SHARP, o nefelômetro do SHARP, os dois sensores T640 (uma unidade no teto, “T640\_Roof”; a outra unidade instalada em um abrigo, “T640\_Shelter”), de 30 de junho a 31 de julho de 2017 na RTP EPA (Environment Protection Agency) dos EUA



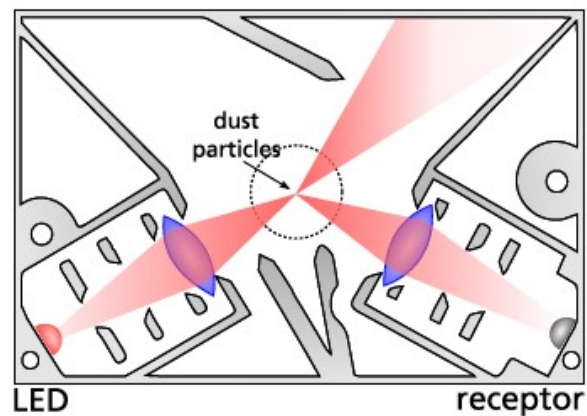
(b) Comparação de concentrações de massa horárias de  $PM_{2.5}$  entre o monitor E-BAM e os dois conjuntos de sensores PMS3003 não calibrados (superior) de 8 a 29 de junho de 2017 (estação das monções) e (inferior) de 23 de outubro a 16 de novembro de 2017 (pós-estação das monções) no IIT Kanpur

Figura 3.7: Sensores de material particulado de baixo custo e seus respectivos preços de venda nos Estados Unidos.

					
Airviz Inc. – Speck	Air Quality Egg	Dylos - DC1700	Shinyei	PurpleAir PA-II (Plantower PMS5003 sensor)	OPC-N2, Alphasense
\$140	\$250	\$ 475	\$ 1000	\$200	\$310

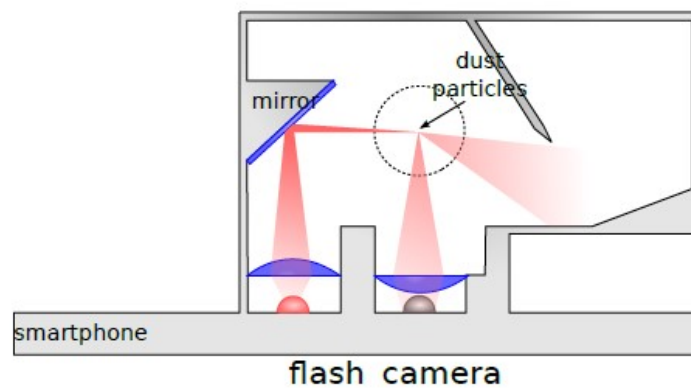
Fonte: (JOVAŠEVIĆ-STOJANOVIĆ et al., ).

Figura 3.8: Nos sensores de dispersão de luz (também conhecidos como nefelômetros), a luz é emitida na câmara de medição. Se houver partículas presentes, a luz é refratada e coletada por um fotodiodo.



Fonte: (BUDDE et al., 2019).

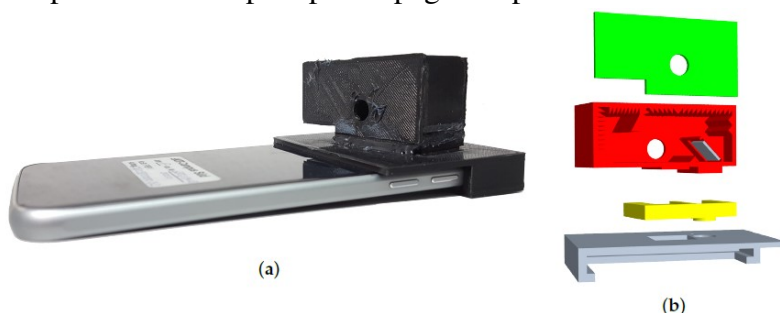
Figura 3.9: Design personalizado da armadilha de luz com um espelho para refletir a luz do LED do flash para a câmara de medição.



Fonte: (BUDDE et al., 2019).

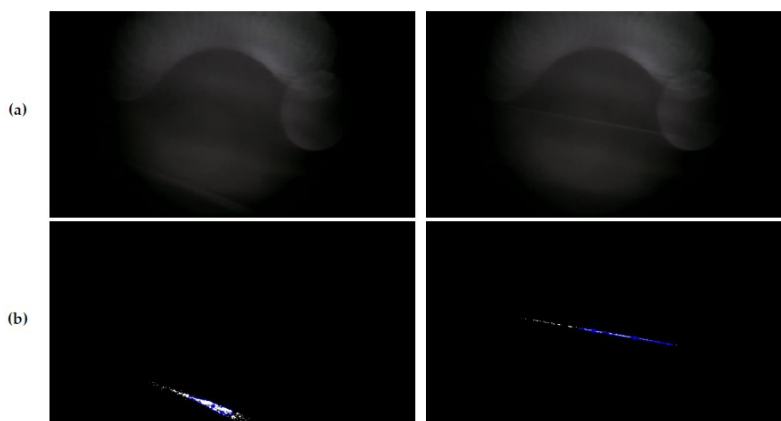


Figura 3.10: Telefone Galaxy S6 com protótipo do sensor FeinPhone. (b) Os módulos de encaixe foram impressos em 3D para prototipagem rápida.



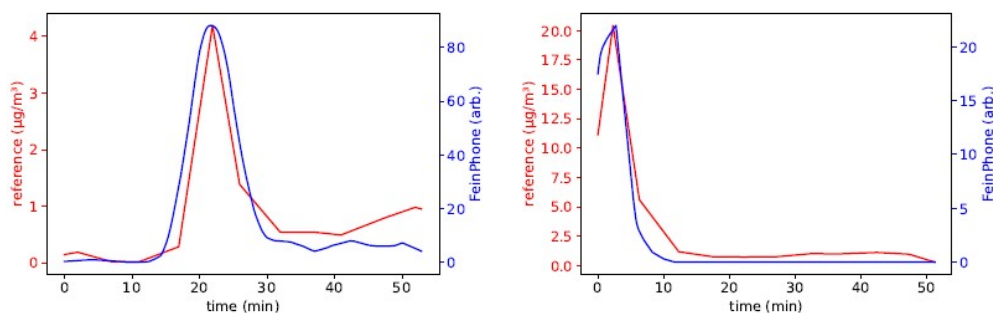
Fonte: (BUDDE et al., 2019).

Figura 3.11: Contagem de partículas para detecção de contorno (CDPC): As gravações originais (a) passam por subtração de fundo, desfoque e binarização antes que um algoritmo de detecção de contorno isole manchas contínuas, das quais todas com uma área que excede um limite predefinido são contadas (b).



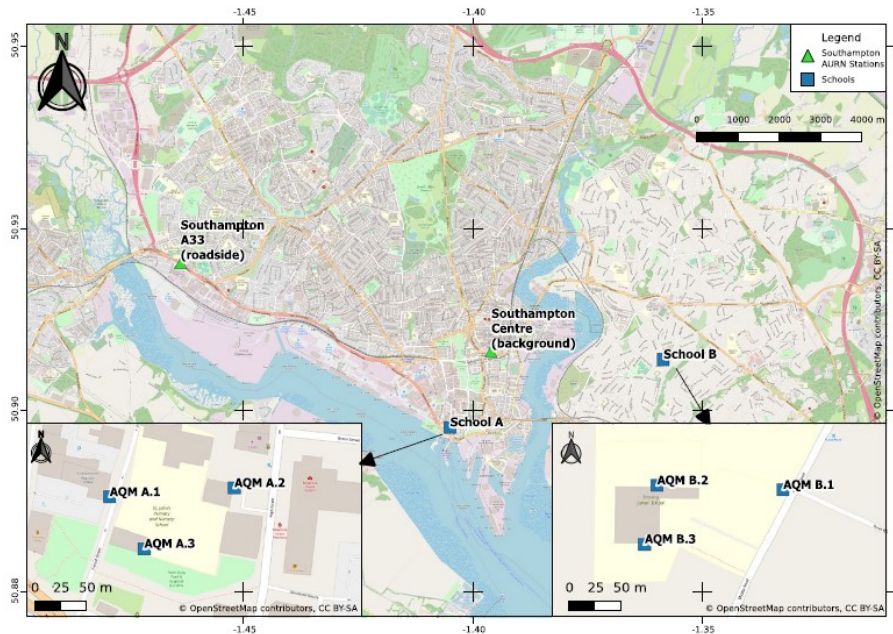
Fonte: (BUDDE et al., 2019).

Figura 3.12: Abordagem combinada: A saída do algoritmo de contagem de partículas (CDPC) é subsequentemente canalizada através da Poisson Particle Detection (PPD). Os gráficos foram deslocados para compensar o atraso de tempo causado pelo método de referência. Eles mostram uma concordância qualitativa muito boa com a fração de tamanho PM(10<sub>2.5</sub>) da referência, mostrada aqui para os sensores B005 (esquerda) e B001 (direita).



Fonte: (BUDDE et al., 2019).

Figura 3.13: Locais dos monitores de qualidade do ar (Air Quality Monitors - AQM) implantados nas escolas A e B.



Fonte: (BULOT et al., 2019).

Figura 3.14: Imagem da tabela de tempo de atividade dos sensores individuais por local e comparação com a estação de referência. Para o AQM B.1, o Alphasense OPC-N2 relatou um sinal aleatório. O Honeywell HPMA115S0 estava operacional apenas para AQM A.1. A tabela também apresenta algumas características dos diferentes locais de instalação.

		Honeywell HPMA115S0	Plantower PMS5003	Plantower PMS7003	Alphasense OPCN2	Height above ground (m)	Location
AQM A	1	91%	94.5%	94.7%	92.6%	3.8	School entrance, East facing
	2	—	96.6%	96.6%	95.9%	2.4	School employees car park (6 parking spaces), East facing
	3	—	99.5%	52.1%	98.9%	3.5	School playground, East facing
AQM B	1	—	57.4%	99.7%	0%	2.1	School entrance, South facing
	2	—	98.9%	98.9%	56.6%	3.4	School playground, North facing
	3	—	95.7%	96.5%	95.7%	3.4	Opposite from the playground, South facing
Reference station			92.8%			4	

Fonte: (BULOT et al., 2019).

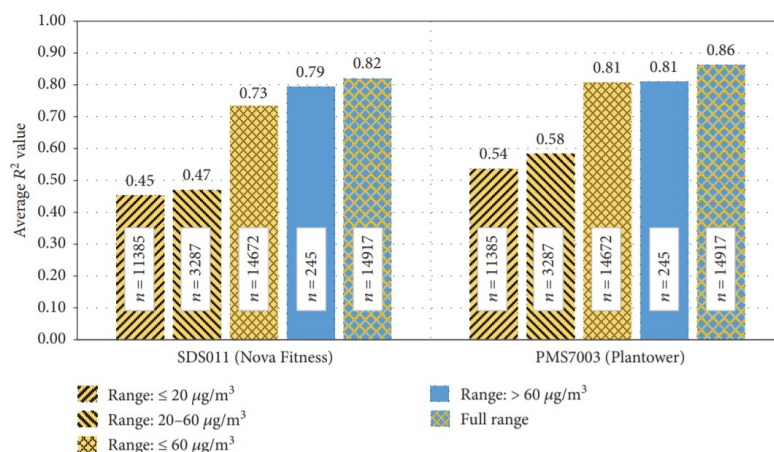
Figura 3.15: Imagem da tabela de Característica dos sensores de PM utilizados no estudo.

TABLE 1: Characteristic of PM sensors used in the research.

Sensor model	SDS011	ZH03A	PMS7003	OPC-N2
Manufacturer	Nova Fitness	Winsen	Plantower	Alphasense
Approximate price (\$)	20	20	20	500
Dimensions (mm)	71 × 70 × 23	50 × 32.4 × 21	48 × 37 × 12	75 × 63.5 × 60
Approximate weight (g)	50	30	30	105
Power supply voltage (V)	5	4.5–5.5	4.5–5.5	4.8–5.2
Working current (mA)	220	70–140	≤100	175
Detectable size range (μm)	0.3–10	0.3–10	0.3–10	0.38–17
Size bins	Not available	Not available	6 size bins	16 size bins
Estimated PM <sub>x</sub> concentration	PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub>	PM <sub>1</sub> , PM <sub>2.5</sub> , and PM <sub>10</sub>	PM <sub>1</sub> , PM <sub>2.5</sub> , and PM <sub>10</sub>	PM <sub>1</sub> , PM <sub>2.5</sub> , and PM <sub>10</sub>
Concentration range (μg/m <sup>3</sup> )	0–999.9	0–1000 (for PM <sub>2.5</sub> )	Effective range: 0–500 Maximum range: above 1000 (for PM <sub>2.5</sub> )	0.01–1500·10 <sup>3</sup> (for PM <sub>10</sub> )

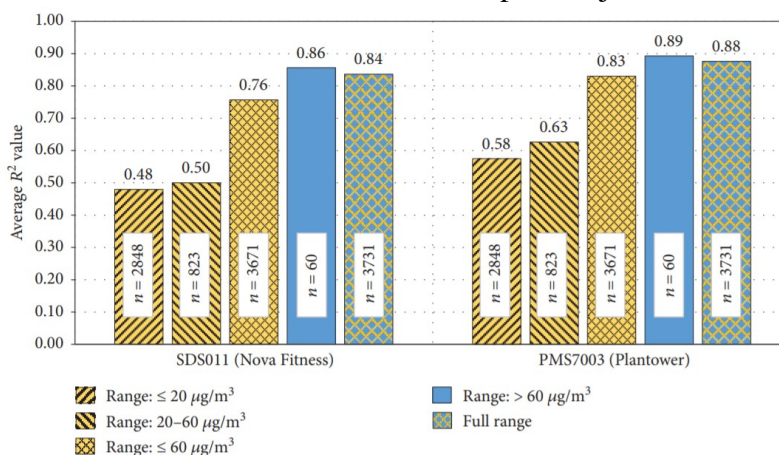
Fonte: (BADURA et al., 2018).

Figura 3.16: Coeficientes médios de determinação ( $R^2$ ) para sensores SDS011 e PMS7003 em diferentes faixas de concentração para médias de 15 min,  $n$  na caixa de texto dentro da barra indica o número de amostras usadas para o ajuste.



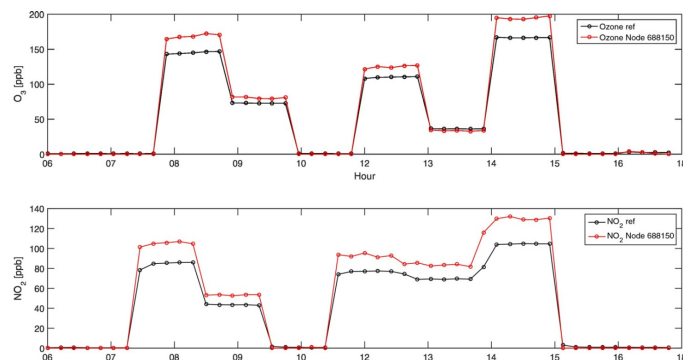
Fonte: (BADURA et al., 2018).

Figura 3.17: Coeficientes médios de determinação ( $R^2$ ) para sensores SDS011 e PMS7003 em diferentes faixas de concentração para médias de 1h,  $n$  na caixa de texto dentro da barra indica o número de amostras usadas para o ajuste.



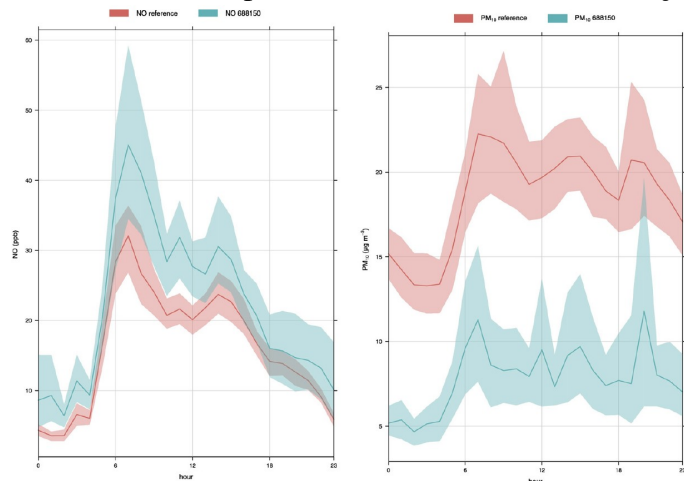
Fonte: (BADURA et al., 2018).

Figura 3.18: Sequências de calibração para sensores  $O_3$  e  $NO_2$  do nó AQMesh.



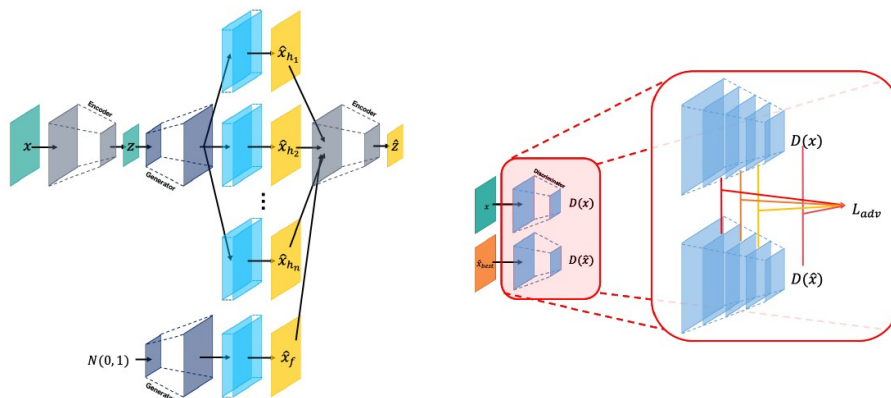
Fonte: (CASTELL et al., 2017).

Figura 3.19: Ciclo diário de concentração médio de abril a setembro de 2015, para  $NO$  (esquerda) e  $PM_{10}$  (direita) pelo nó do sensor 688150 (azul) e o instrumento de referência (vermelho). As áreas sombreadas representam o intervalo de confiança de 95%.



Fonte: (CASTELL et al., 2017).

Figura 3.20: A arquitetura do modelo proposto HP-GAN. A poda é realizada após a geração dos ramos por várias hipóteses. é proposto um único codificador, gerador e discriminador. Também são utilizadas várias redes de hipóteses adicionais coloridas em ciano.



Fonte: (PARK; PARK; KIM, 2021).

## 4 METODOLOGIA

O monitoramento da qualidade do ar interno é uma necessidade, como apontado pelos capítulos anteriores. Como fazer com que equipamentos de baixo custo, que tenham qualidade de monitoramento adequados, que possam interagir de forma imediata com os usuários, que possam fornecer subsídios para que o gestor escolar crie protocolos que atenuem a potencial insalubridade do meio ambiente educacional? A fim de responder a tais questionamentos, buscou-se uma metodologia com o intuito de maximizar a abrangência e impacto potencial da proposta.

O presente projeto usa a experiência pessoal de mais de 20 anos com robótica educacional. O primeiro contato se deu em 1999 com os equipamentos da empresa Parallax<sup>1</sup>, os Boe-Bot, que utilizavam os controladores BS2, fonte de inspiração para os famosos Arduino. Lidar com equipamentos de robótica se assemelha muito com equipamentos e software para a aquisição de dados de poluentes aqui proposto.

Desde 1999 os trabalhos desenvolvidos foram avançando para projetos de maior complexidade, chegando até a robô destinado a desobstrução de linhas de extração de petróleo, nas área do pré-sal, chegando a profundidades de até 3.000 m. Outros trabalhos foram desenvolvidos para o monitoramento de poluição industrial, com requisitos de normas técnicas rígidas. Toda esta experiência foi trazida para criar este sistema, com o auxílio por vezes de colaboradores especialistas em suas áreas, como designer de placas de circuito impresso, projetista e profissionais da saúde.

A maior parte da metodologia aqui descrita tem como objetivo auxiliar os professores e estudantes com as dificuldades que serão encontradas no que tange a implementação das tecnologias propostas. Por exemplo, em apenas dois projetos de desenvolvimento de robótica educacional para o Ministério da Educação, ROBO+EDU<sup>2</sup> ou Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação, ROBOCETI, dos quais participei de toda a elaboração e execução, liderados pelo Prof. Dante Barone, foi possível identificar as dificuldades que os professores e estudantes encontram no momento de escolher os componentes, as técnicas, os fornecedores, a linguagem de programação, os sensores e, ainda assim existem o mundo físico, que não se dobra a nossa vontade, temos que nos moldar a natureza dos fenômenos se desejamos medir variáveis ambientais ou de poluentes.

Como resultados destes projetos com as tecnologias e métodos aqui experimentados, pode-se citar o impacto acadêmico para outros trabalhos:

---

<sup>1</sup>[www.parallax.com/boe-bot-robot/](http://www.parallax.com/boe-bot-robot/)

<sup>2</sup><http://www.ufrgs.br/robomaisedu>

- Citação ROBO+EDU: Computação na Educação Básica: Fundamentos e Experiências(RAABE; ZORZO; BLIKSTEIN, 2020);
- Citação ROBO+EDU: Robótica Pedagógica, uma Forma Lúdica para o Ensino de Ciências na Região Amazônica: Fundamentos e Experiências(OLIVEIRA; FONSECA, );
- Citação ROBO+EDU: Robótica Pedagógica, uma forma diferenciada para o ensino de Ciências na região Amazônica(OLIVEIRA; FONSECA, 2018);
- Uso do ROBO+EDU: A robótica educacional e seu potencial como ferramenta de explicitação de invariantes operatórios relacionados a conceitos matemáticos(SANTOS; PINHEIRO, 2020)
- Uso do ROBOCETI: Robótica educativa como motivação ao ingresso em carreiras de engenharia e tecnologia: o projeto ROBOCETi(CARVALHO; BARONE; TELES, 2009);
- Citação ROBO+EDU: RoboEdu 2.0(FREITAS et al., 2019);
- Citação ROBO+EDU: Desenvolvimento de um protótipo de um ambiente integrado baseado em um robô educacional visando o ensino de conceitos básicos de programação(NONNENMACHER et al., 2022);
- Citação ROBO+EDU e ROBOCETI: Robótica Educacional: Veículo Autônomo Como Prática de Aprendizagem de Modelagem Matemática na Engenharia Mecânica(REGNER et al., 2017);
- Citação ROBOCETI: Interatividade com a Ciência Tecnológica(VALINS; ANDRADE; LUNARDI, 2017);
- Uso do ROBOCETI: Interatividade com a Ciência Tecnológica(SANTOS; SIQUEIRA; VEIGA, );
- Citação do ROBOCETI: Mecatrônica Como Objeto De Interação Entre O Curso De Engenharia Mecânica E O Mestrado/Doutorado Em Modelagem Matemática(RITTER et al., 2016);
- Citação do ROBOCETI: Oficinas de Robótica Educacional nas Escolas Públicas de Ensino Fundamental em Goiânia(FLEURY, );
- Citação do ROBOCETI: Metodologia didática para a modelagem matemática da cinemática direta e inversa de robôs industriais: um estudo de caso do robô antropomórfico(GOERGEN et al., 2018);
- Citação do ROBOCETI: Construtivismo e Robótica Educacional: a Construção de

Conceitos Matemáticos(JUNIOR; COELHO; BARRA, 2015);

- Citação do ROBOCETI: Desenvolvimento de Hardware para ensino de matemática aplicando processo de gamificação(PRUDENTE, 2022);
- Uso do ROBO+EDU: ROBO+EDU: Project and Implementation of Educational Robitics in Brazillian Public Schools(RIBEIRO; BARONE; MIZUSAKI, 2015);
- Uso do ROBOCETI: Análise Da Evasão Discente No Curso De Engenharia Mecânica Da Unijuí E Proposição De Soluções(VALDIERO et al., 2014);
- Uso do ROBOCETI: Robótica Educacional e o Ensino de Matemática: Um experimento educacional em desenvolvimento no ensino fundamental(GALVÃO et al., 2018).

Os itens aqui descritos buscam fazer um apanhado das maiores dificuldades que normalmente são encontradas e, não tem como objetivo uma listagem de partes e componentes de um kit de aquisição de dados e comunicação. Cada abordagem deve ser lido como um guia, que irá auxiliar professores e estudantes que buscam informações na internet, que nem sempre trazer as informações que poderão impactar na confecção do seus sistema de aquisição de dados de poluentes. Por exemplo, pouco se escreve da dificuldade de conectar elementos sem solda, nem sempre há uma pessoal com a habilidade correta para essa tarefa. Como sensores de temperatura e umidade devem ser expostos ao ambiente, para que a informação desejada dele seja lida, deve-se atentar para que esta informação não seja contaminada pela própria caixa de contenção, que possuem os dados influenciados pela característica física de geração de calor do sistema eletrônico.

A literatura relata a necessidade de serem desenvolvidos equipamentos que sejam personalizados para que as características ambientais, geográficas e sazonais sejam consideradas, a fim de uma correta interpretação dos dados ambientais coletados. Para o desenvolvimento do hardware, foram elencados requisitos mínimos:

- Permita a coleta de informações de ambientes educacionais internos, com possibilidade de externos;
- Atenda a requisitos mínimos de qualidade de sensoriamento, conforme a ANVISA preconiza ou na ausência de técnica, conforme trabalhos correlatos indicam;
- Possua capacidade de integração com a internet, nos moldes dos equipamentos de baixo custo e baixo consumo de energia;
- Tenha como foco um custo benefício que possa atingir o maior público alvo possível sem perder a qualidade do monitoramento;

- Seja capaz de ser programado por software aberto;
- que possa ser produzido pelas escolas com o auxílio de técnicas como impressão 3D e montagem placas de circuito impresso manufaturadas, muito adequado para o conceito FaLab (*Fabrication Laboratory*<sup>1</sup>), ou espaços maker.

Adquirir dados do mundo real é uma tarefa bastante complexa. Nos dias atuais temos acesso a aplicativos em smartphones que nos apresentam dados de forma muito rápida e prática, como dados de previsão do tempo, aparentemente muito simples. Porém, os sensores que fazem a leitura de variáveis como temperatura ou poluentes, utilizam técnicas já relatadas no Capítulo 3 que apresentam desafios de confiabilidade inerentes às técnicas. Além de fazer a leitura das variáveis com a maior confiabilidade possível, há também a necessidade de se trazer as informações para o usuário através de um sistema de comunicação que nos dias de hoje leva para a internet, onde haverá acesso ubíquo a elas. Se além do acesso pela internet deseja-se a atualização das informações em tempo real, mais tecnologia deve ser incorporada. A fim de ilustrar de forma mais didática, no apêndice A encontra-se a evolução das versões de testes de forma mais ilustrativa, até se chegar a cada versão final.

Foram criadas duas estratégias, uma para a confecção do hardware com o auxílio da terceirização de serviços e outra buscando seguir a tendência da cultura maker<sup>2</sup>., com a fabricação em laboratórios, com a utilização de mão de obra própria e equipamentos próprios ou de parcerias, como a rede FabLAB<sup>3</sup>, universidades ou empresas locais:

- Fabricação com o uso de serviços de terceiros contratados:
  - Confecção de placas de circuito impresso;
  - Uso de elementos do tipo SMD<sup>4</sup>;
  - Confecção da caixa de contenção dos elementos;
- Fabricação sem o uso de serviços de terceiros contratados:

---

<sup>1</sup>É um makerspace, porém com algumas regras específicas. Todo FabLab precisa ter no mínimo 5 tipos de máquinas: impressoras 3D, cortadora a laser, cortadora de vinil, CNC de precisão de pequeno porte e CNC de grande porte. É necessário também ter um dia aberto ao público, para poderem usar as máquinas. Há uma fundação mundial de FabLabs, a FabFoundation, que dita as regras da comunidade global de FabLabs. Nos dias abertos, sempre há alguém responsável por ensinar você a usar as máquinas, mas lembre-se, eles não farão o seu projeto, apenas irão te ensinar a manusear as máquinas, para evitar acidentes e te permitir criar o que você quiser (<<https://blog.fazedores.com/makerspaces-hackerspaces-e-fablabs-no-brasil>>).

<sup>2</sup>No contexto educacional a cultura maker busca explorar as atividades práticas em sala de aula, possibilitando a criação e resolução de problemas ao se construir protótipos e outros objetos que visam desenvolver diferentes habilidades (de Paula et al, 2019)

<sup>3</sup><https://www.fablabs.io/organizations/rede-fab-lab-brasil>

<sup>4</sup>Surface Mounted Device (em tradução livre: componente montado em superfície)



- Confeção de placas de circuito impresso através de placas de fenolite com posterior corrosão para destaque do circuito<sup>12</sup> ou com o uso de FabLAB para a remoção do cobre excedente por usinagem (com o uso de fresadora<sup>3</sup>);
- Uso de elementos do tipo PTH<sup>4</sup>;
- Impressão 3D da caixa de contenção dos elementos.

## 4.1 HARDWARE COM FABRICAÇÃO INDUSTRIAL

Os trabalhos prévios desenvolvidos mostraram que o uso de sensores requer qualidade na fabricação do sistema de aquisição, bem como técnicas físicas para isolamento do ambiente que se deseja mensurar não tenha influência de corpos ou materiais próximos, ou mesmo do próprio equipamento de medição.

Inicialmente foram utilizadas placas de aquisição e processamento de dados facilmente encontradas no mercado, de baixo custo, como a Arduino Uno<sup>5</sup> (Figura A.1, NodeMCU (Node MicroController Unit) com ESP8266<sup>6</sup> e NodeMCU com ESP32<sup>7</sup>, como será detalhado a seguir. Para a parte de comunicação foram utilizados módulos de comunicação do tipo ESP-01, depois passando para ESP8266 e ESP32, que já possuem a comunicação integrada.

### 4.1.1 Placa de aquisição de dados e microcontrolador

Os trabalhos começaram em meados de 2017, com uma placa Arduino Uno R3<sup>8</sup>. O principal atrativo para a escolha desta placa foi a sua notória difusão entre robistas, que criaram uma vasta gama de bibliotecas de código para quase qualquer periférico, atuador, placa de comunicação ou sensor que se deseja utilizar neste nível técnico.

Com a necessidade de realizar transferência de dados através de uma antena de WiFi externa e, com as portas de comunicação dos módulos de antena sendo em nível ló-

<sup>1</sup><https://www.filipeflop.com/blog/como-fazer-uma-placa-de-circuito-impresso/>

<sup>2</sup><<http://www2.ecomp.poli.br/wp-content/uploads/2013/08/Tutorial-Confeccao-de-placas-de-circuit-o-impresso.pdf>>

<sup>3</sup><https://www.youtube.com/watch?v=EHUzy7ukL3s>

<sup>4</sup>Pin Through Hole (em tradução livre: terminal inserido no furo)

<sup>5</sup><https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>

<sup>6</sup><https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266>

<sup>7</sup><https://www.espressif.com/en/products/modules/esp32>

<sup>8</sup><https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>

gico de 3.3V, diferente dos 5V da Arduino, buscou-se uma solução que não dependesse de ferramentas e habilidades para a conversão desse nível lógico. Para tal foi escolhido o NodeMCU, que é um ambiente de desenvolvimento de software e hardware de código aberto construído em torno de um System-on-a-Chip (SoC) de baixo custo chamado ESP8266. O ESP8266, projetado e fabricado pela Espressif Systems, contém os elementos fundamentais de um computador: CPU, RAM, rede (WiFi), sendo uma excelente opção para projetos de Internet das Coisas (IoT).

A Espressif lançou em 2016 o microcontrolador ESP32, uma evolução da anterior ESP8266. Agora com maior capacidade de processamento, maior memória, mais pinos de portas analógicas, e um pouco mais cara também. Com a ESP32 a dificuldade da quantidade de portas analógicas foi dissolvida, ainda restava a questão da pinagem auxiliar. Uma tentativa de resolver isso foi utilizar placas de fenolite perfuradas (também chamadas de ilhadas), facilmente encontradas em diversos tamanhos e configurações<sup>1</sup>.

O uso destas placas facilitou bastante a configuração e montagem mecânica, servindo de suporte para toda a estrutura. Porém, houve a necessidade de um domínio básico da técnica de soldar componentes eletrônicos, o que pode gerar uma dificuldade para a difusão desejada.

Com uma oferta bastante vasta para a confecção de placas de circuito impresso<sup>2</sup>, optou-se por desenhar uma placa e receber ela pronta de uma empresa, através de orçamento feito pela internet e recebimento sem necessidade de deslocamento, como qualquer compra usual da internet.

A placa de testes finalizada desenhada, a fim de obedecer sugestões do fabricante do sensor de umidade e temperatura:

- Conexões por fios, entre sensor e microcontrolador devem ser evitadas, principalmente fios com alguns centímetros, para que não haja erro de leitura;
- Sensores embarcados devem ser dispostos de tal forma que o aquecimento produzido pelo circuito não afete a leitura, devendo ser evitada a transferência de calor por condução através da placa;

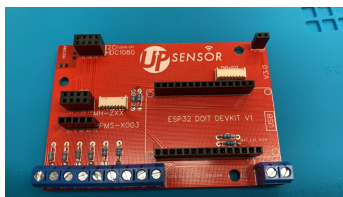
Na Figura A.10, a terceira versão da placa, com um afastamento longo do sensor de umidade e temperatura, jogando-o para fora da caixa, fazendo com que ele ficasse exposto, com uma proteção específica, Figura A.10.

---

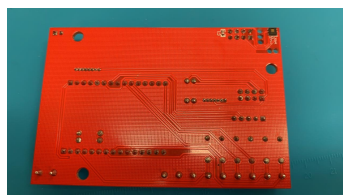
<sup>1</sup><https://www.google.com/search?q=placas+de+fenolite+ilhada>

<sup>2</sup><https://www.google.com/search?q=placa+de+circuito+impresso>

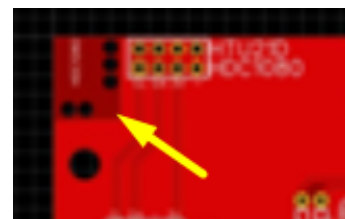
Figura 4.1: Primeira pcb desenhada com montagem e detalhe do sensor de umidade e temperatura com ventilação forçada para troca de calor com o meio externo.



(a) Segunda versão de pcb com bornes para conexão rápida.



(b) Verso da segunda versão de pcb.



(c) Detalhe do isolamento do sensor de umidade e temperatura integrado na placa.

Fonte: Autor.

#### 4.1.2 Sensores

Como foi relatado nos capítulos anteriores, um dos pilares do trabalho é o sensoriamento a ser realizado de forma automática, sem a necessidade contínua da intervenção humana. As variáveis a serem monitoradas inicialmente eram aquelas que a OMS indica como sendo os poluentes que são monitorados para controle da poluição, massivamente poluição externa, muitas vezes associada com parques fabris, atividades da economia primárias e veículos. Diversos projetos ao redor do mundo buscam compreender a eficiência e quais aplicações são ou serão possíveis com este novo tipo de tecnologia (SALTHAMMER et al., 2016). Para o trabalho em ambientes internos, os poluentes mudam um pouco, sendo que a ANVISA possui dois quadros para poluentes internos, tanto de origem orgânica quanto de origem química (ver ANEXO C, Fonte ANVISA<sup>1</sup>). Para o presente trabalho, após revisão de trabalhos correlatos, foram elencados algumas fontes químicas candidatas de análise:

- Cera, mobiliário, produtos usados em limpeza e domissanitários, solventes, materiais de revestimento, tintas, colas, etc.;
- Queima de cigarro, charuto, cachimbo, etc.;
- Poeira e fibras;
- Materiais de acabamento, mobiliário, cola, produtos de limpeza domissanitários;
- Máquinas copiadoras e impressoras a laser;
- Produtos de metabolismo humano e combustão.

<sup>1</sup>Resolução 09 de 16 de janeiro de 2003/ANVISA – Resolução que apresenta padrões referenciais e/ou orientações para esse controle através de orientações técnicas sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Disponível em: [http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE\\_09\\_2003\\_1.pdf/](http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_1.pdf/), Acesso em: 20 abr 2021.

Figura 4.2: Placa de circuito impresso em sua última versão modificada, agora com o sensor de umidade e temperatura integrado e preso a um apêndice distante do restante da placa, com muita área de troca de calor.



Fonte: Autor.

Para cada potencial poluente deve-se associar um tipo de técnica de medição, o que irá impactar tanto na forma de coletar o dado da variável, quanto o custo ou mesmo a forma de aquisição do dado (medição analógica ou digital).

Além dos poluentes listados, a umidade e temperatura, além de serem parâmetros associados ao conforto térmico, também são necessários para que haja a correta utilização dos sensores em relação a interpretação dos dados analisados, normalmente afetados pela variação destes parâmetros.

Após avaliação já citada anteriormente, os sensores candidatos a serem incorporados e avaliados foram:

- sensor de compostos orgânicos voláteis;
- sensor de material particulado;
- sensor de dióxido de carbono;
- sensor de umidade e temperatura.

Tabela 4.1: Associação entre poluente ou variável ambiental a ser monitorada e a técnica/sensor a ser utilizada.

Fonte de poluição	Sensor
Cera, mobiliário, produtos usados em limpeza e domissanitários, solventes, materiais de revestimento, tintas, colas, etc	sensor de compostos orgânicos voláteis
Queima de cigarro, charuto, cachimbo, etc.	sensor de fumaça
Poeira e fibras.	sensor de material particulado
Materiais de acabamento, mobiliário, cola, produtos de limpeza dos sanitários	sensor de formaldeídos
Máquinas copiadoras e impressoras a laser	sensor de ozônio
Produtos de metabolismo humano e combustão.	sensor de dióxido de carbono

Fonte: ANVISA, RE 09/2003

#### 4.1.2.1 Compostos Orgânicos Voláteis (VOC)

O sensor escolhido de VOC para testes iniciais foi o SGP30<sup>1</sup>, da empresa Sensirion, montado sobre uma MCU chamada CJMCU (de fabricante desconhecido, mas muito popular no universo dos sensores), podendo ser encontrado montado sobre outras placas de integração, então chamados de módulos, ver Figura A.11. O custo médio do sensor é em torno de USD 8.00 (sem impostos). É um sensor de gás utilizado para manter em níveis controlados a qualidade do ar de ambientes internos. É capaz de fazer a detecção de uma ampla gama de VOCs e H<sub>2</sub>, retornando em seus pinos uma leitura de Composto Orgânico Volátil Total (TVOC) e Equivalente de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>eq). O sensor possui as seguintes características técnicas:

- Fabricante: Sensirion
- Temperatura operacional: - 40 °C até + 85 °C
- Tensão de alimentação operacional: 1.8 V
- Potência nominal: 48.2 mA
- Tensão de alimentação: 1.62 V - 1.98 V
- Comunicação: protocolo I<sub>2</sub>C
- Faixa de leitura TVOC: 0 até 60000 ppb (parte por bilhão)

<sup>1</sup><https://sensirion.com/us/products/catalog/SGP30/>

Tabela 4.2: Associação entre poluente ou variável ambiental a ser monitorada e a técnica/sensor a ser utilizada.

Fonte de poluição	Sensor	Avaliação
Cera, mobiliário, produtos usados em limpeza e domissanitários, solventes, materiais de revestimento, tintas, colas, etc	sensor de compostos orgânicos voláteis	sensores de baixo custo disponíveis de difícil interpretação, necessitam de ambiente de calibração específico, laboratorial
Queima de cigarro, charuto, cachimbo, etc.	sensor de fumaça	sensores de baixo custo, fácil implementação, mas com utilidade não prática, uma vez que no Brasil não é permitido o fumo em ambientes educacionais
Poeira e fibras	sensor de material particulado	sensores gravimétricos são o padrão, mas muito caros, sensores óticos de fácil utilização e baixo custo
Materiais de acabamento, mobiliário, cola, produtos de limpeza domissanitários	sensor de formaldeídos	sensores de baixo custo disponíveis de difícil interpretação, necessitam de ambiente de calibração específico, laboratorial
Máquinas copiadoras e impressoras a laser	sensor de ozônio	sensores de baixo custo disponíveis, mas as fontes de poluição são muito específicas e pontuais, não abrangendo a maioria da população alvo
Produtos de metabolismo humano e combustão.	sensor de dióxido de carbono	sensores químicos são o padrão, mas muito caros, sensores óticos de fácil utilização e baixo custo
Conforto térmico.	sensores umidade e temperatura	sensores mais difundidos e de baixo custo

Fonte: ANVISA, RE 09/2003

#### 4.1.2.2 *Material particulado (PM)*

O material particulado tem como medição fundamental a sua massa distribuída no ar, ou seja, medimos a concentração de matéria em relação a uma certa quantidade de volume de ar amostral. As unidades de medida comumente utilizadas são  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (micrograma por metro cúbico), e em menor aparição ppm (parte por milhão). Como descrito no Anexo D, os amostradores gravimétricos possuem filtros para cada tamanho de partícula que se deseja medir, fazendo duas medições de massa, uma antes do período de amostragem e outra depois, e a diferença detectada é a quantidade de material contido no ar. O controle de umidade e temperatura são cruciais, a fim de não se confundir a umidade além

Figura 4.3: Módulos com integração do sensor de VOC SGP30.



(a) Módulo exemplo



(b) Módulo exemplo

Fontes: a) <https://forum.airgradient.com> e b) <https://www.usinainfo.com.br/>.

do estipulado, potencialmente contida no material a ser feita a medição.

Equipamentos de medição gravimétrica são caros e/ou de difícil operação, não sendo foco deste trabalho. Foram analisados sensores de material particulado que utilizam a técnica de Infravermelho Não Dispersivo (NDIR, Non Dispersive InfraRed), muito mais baratos e de fácil aquisição de dados, aqui uma lista com diversos disponíveis no mercado<sup>1</sup>. Com base na pesquisa relatados tanto no capítulo de Referencial Teórico, quanto Trabalhos Correlatos, alguns sensores foram escolhidos tomando como princípios fundamentais o baixo custo, a oferta no mercado brasileiro e a capacidade de ser incorporado em projetos em escolas, com menor necessidade de infraestrutura laboratorial e de pessoal especialista.

O sensor GP2Y1014AU0F<sup>2</sup>, da fabricante Sharp, foi a primeira opção de testes, tendo como principal atrativo a larga difusão da linha no início dos trabalhos e o baixíssimo custo (em torno de USD 8.00, sem impostos). É uma versão de precisão em relação ao seu antecessor mais popular GP2Y1010AU0F, ambos utilizando uma saída analógica para a leitura do sensor.

Os sensores de saída analógica requerem bastante cuidado para que as leituras possam ser realizadas, pois é necessário fazer uma conversão entre os valores mínimo e máximo de saída de tensão elétrica, que é a informação do sensor, para poder ser convertido para a concentração da substância medida, normalmente de forma linear. Alguns sensores já possuem calibração de fábrica ou são auto calibráveis. A maioria dos sensores analógicos requer calibração. No caso do sensor da Sharp era necessário que se colocasse o sensor aos extremos de concentração de material particulado, tanto ar puro quanto fumaça densa, a fim de se obter as correlações entre os valores mínimo e máximo

<sup>1</sup><https://en.gassensor.com.cn/ParticulateMatterSensor/list.html>

<sup>2</sup>[https://br.mouser.com/datasheet/2/365/GP2Y1014AU0F\\_SPEC-1288381.pdf](https://br.mouser.com/datasheet/2/365/GP2Y1014AU0F_SPEC-1288381.pdf)

de tensão elétrica de saída e concentração de em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de material particulado. Não foram encontradas no mercado brasileiro, de forma fácil, as versões do sensor que facilitariam as leituras, como os sensores GP2Y1026AU0F e GP2Y1027AU0F, então não foram utilizadas.

Outra particularidade que os sensores e outros componentes possuem é o formato de conexão dos pinos, que podem variar de tamanho e de distância entre pinos. Por exemplo, o GP2Y1014AU0F usa um padrão de pinos com uma distância de 1,50 mm entre eles, já uma placa Arduino usa o padrão de 2,54 mm de distância entre pinos, impedindo a conexão de conectores com a mesma terminação, pois ou não encaixa em pino ou no outro pino. Para resolver isso é necessário uma placa de fenolite auxiliar, para que a extremidade de um tipo de conector seja adaptada através da placa.

Devido às dificuldades citadas, outro tipo de sensor, com comunicação do tipo UART (*Universal Asynchronous Receiver / Transmitter*). Utiliza dois pinos, um RT (transmissor) e outro receptor (RX), que utilizam um protocolo, ou seja, um conjunto de regras para a troca de dados seriais entre dois dispositivos Além disto, estes sensores noemalmente possuem calibração prévia e auto calibração. Alguns sensores foram testados, como os PMS5003<sup>1</sup> e PMS7003<sup>2</sup>, da Plantower e o SPS30<sup>3</sup>, da Sensirion.

Os sensores da Plantower são muito populares, com inúmeros projetos de monitoramento de qualidade do ar de baixo custo, tendo sido implementados e com fácil acesso aos resultados. Ainda continuam com a dificuldade de atingir padrões de excelência dos sensores gravimétricos ou de referência, principalmente para detecção de material particulado  $\text{PM}_{10}$ , e também para funcionamento com ambientes com elevados valores de umidade relativa do ar. O custo médio é em torno de USD 16.00, sem impostos.

O sensor PMS7003 é bastante similar em relação ao PMS5003.

Ele é um modelo posterior e possui um consumo de energia um pouco menor que seu antecessor, mas com maior diferencial para seu tamanho e peso serem reduzidos, o que pode auxiliar em projetos que necessitem de menor volume. Seu custo se equipara ao do PMS5003, porém necessita de um adaptador para seguir com o mesmo padrão de conector, elevando um pouco o custo, ficando em torno de USD 18, sem impostos. Uma

---

<sup>1</sup><https://www.digikey.jp/htmldatasheets/production/2903006/0/0/1/PMS5003-Series-Manual.pdf>

<sup>2</sup><https://www.espruino.com/datasheets/PMS7003.pdf>

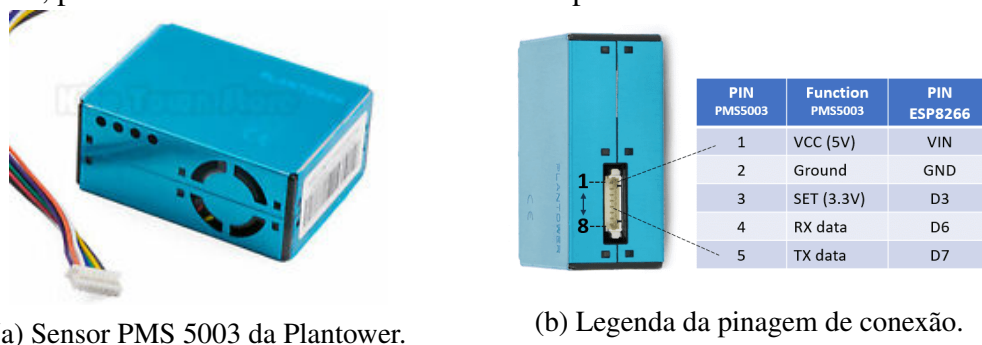
<sup>3</sup><[https://sensirion.com/media/documents/8600FF88/616542B5/Sensirion\\_PM\\_Sensors\\_Datasheet\\_SPS30.pdf](https://sensirion.com/media/documents/8600FF88/616542B5/Sensirion_PM_Sensors_Datasheet_SPS30.pdf)>

<sup>1</sup><https://www.pieterbrinkman.com/wp-content/uploads/sites/7/2021/02/image-7-768x392.png>

<sup>2</sup><[https://64.media.tumblr.com/d7bf25f0006eb145ec40e2376e4f55d3/tumblr\\_inline\\_olabck7Y6S1tpqui5\\_1280.png](https://64.media.tumblr.com/d7bf25f0006eb145ec40e2376e4f55d3/tumblr_inline_olabck7Y6S1tpqui5_1280.png)>



Figura 4.4: PMS5003, da Plantower, com exemplo de conexão com um NodeMCU ESP8266, podendo ser utilizada a mesma conexão para os modelos citados<sup>1</sup>.

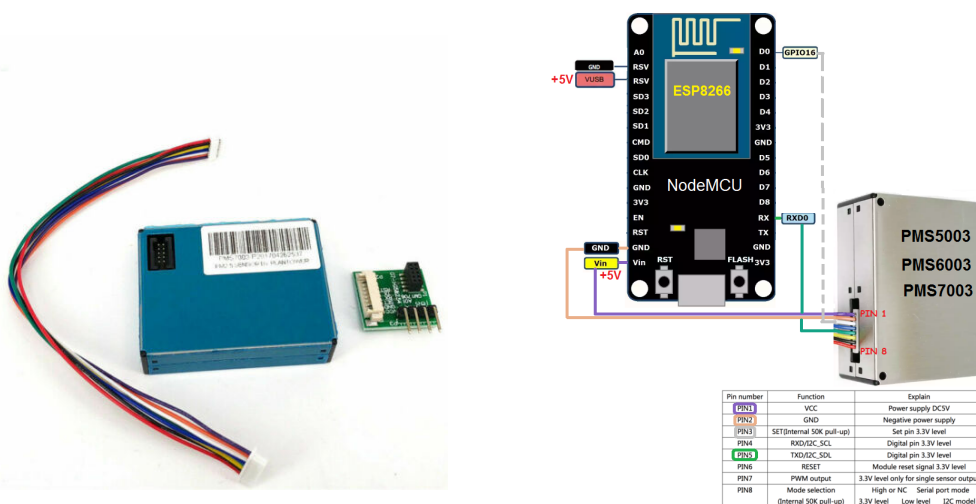


(a) Sensor PMS 5003 da Plantower.

(b) Legenda da pinagem de conexão.

Fonte: .pieterbrinkman.com.

Figura 4.5: PMS7003, da Plantower, com exemplo de conexão com um NodeMCU ESP8266<sup>2</sup>.



(a) Sensor PMS7003 da Plantower.

(b) Legenda da pinagem de conexão.

Fonte: 64.media.tumblr.com.

comparação de desempenho pode ser encontrada no website do projeto AQICN<sup>3</sup>. Ambos sensores utilizam o padrão de conector com pitch de 2,54 mm em 6 vias.

O sensor SPS30 da Sensirion é um desempenho superior aos já citados, com um custo também mais elevado, em torno de USD 29, sem impostos.

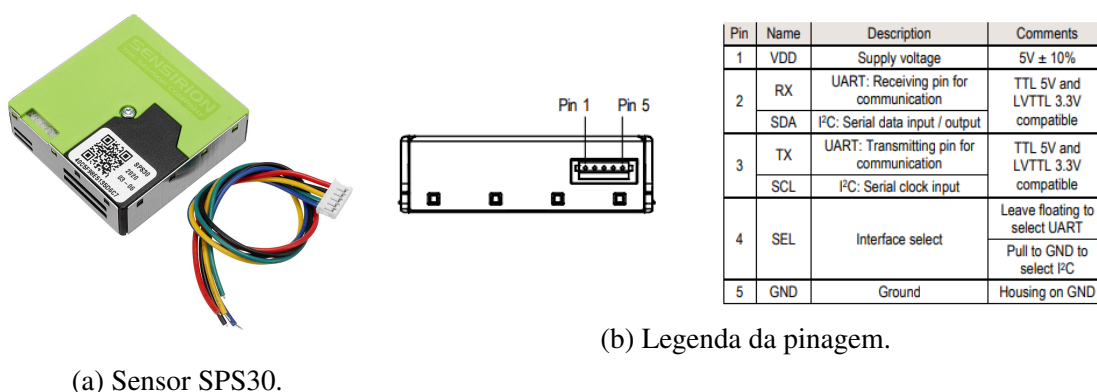
Para o SPS30 tem-se mais um tipo de conector diferente, agora com pitch de 1,5 mm e 5 vias, que possui capacidade de comunicação de dados através dos protocolos I<sup>2</sup>C e UART. O consumo de energia é menor que os anteriores e possui capacidade de leitura de 4 faixas de tamanho de partículas. Também é o primeiro sensor de baixo custo com certificação internacional mCERTs, específica para PM<sub>2,5</sub>, da certificadora CSA Group,

<sup>3</sup><http://aqicn.org/sensor/pms5003-7003/>

<sup>1</sup><https://sensirion.com/media/portfolio/series/image/4df6fc7a-b697-493b-aa0f-f203ba562e11.png>

<sup>1</sup><https://www.csagroup.org/wp-content/uploads/MC-20035001.pdf>

Figura 4.6: SPS30, da Sensirion na direita e a interface de conexão, possuindo tanto comunicação I<sub>2</sub>C quanto UART<sup>1</sup>



(a) Sensor SPS30.

(b) Legenda da pinagem.

Fonte: Sensirion.

do Reino Unido, que juntamente com a EPA (U.S. Environmental Protection Agency), dos Estados Unidos e TÜV Rheinland, da Alemanha, formam o conjunto de instituições que são reconhecidas pela ANVISA como de excelência. Seus certificados podem ser reconhecidos no Brasil, quando este não possuir certificação específica, como é o caso de monitoramento de material particulado através da técnica NDIR, que não possui norma brasileira, somente para equipamentos com a técnica gravimétrica.

Resultados de testes de correlação do SPS30 com equipamentos de referência realizados pelo centro de pesquisa South coast AQMD, podem ser encontrados em seu website<sup>2</sup>.

#### 4.1.2.3 Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Os sensores de dióxido de carbono encontrados na pesquisa e disponíveis no mercado brasileiro são basicamente de 3 tipos: sensores eletroquímicos, sensores de metal-óxido e sensores óticos. Sensores de dióxido de carbono utilizados em ambiente industrial são os mais difundidos, mas devido seu valor mais elevado (mais de USD 150.00) não foram considerados.

O primeiro sensor considerado para a pesquisa, dentre os estudados, foi o MG811<sup>3</sup> montado sobre um módulo, a fim de facilitar a implementação com o circuito de alimentação e interpretação do sinal analógico já pronto. Seu custo médio é em torno de USD 20.00 com módulo, podendo variar bastante dependendo do fornecedor, sem impostos.

<sup>2</sup><https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/sensirion-sps30-evaluation-kit-field-evaluation.pdf>

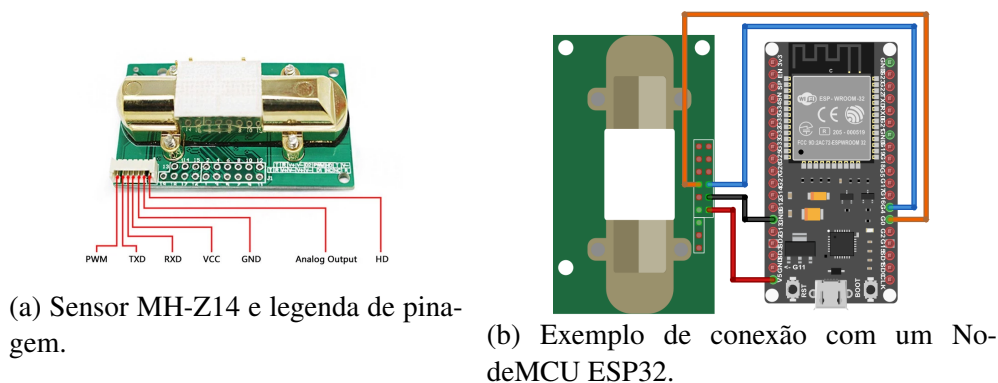
<sup>3</sup><https://sandboxelectronics.com/files/SEN-000007/MG811.pdf>

Ele é um sensor eletroquímico bastante popular, com diversas empresas comercializando ele sobre seus módulos.

Uma das características já comentadas sobre os sensores analógicos é a necessidade de uma calibração. Para este sensor os módulos trazem um potenciômetro, uma resistência variável que é utilizada para esta calibração, como mostra a imagem da direita. Este tipo de calibração requer os ambientes de extremos, como já comentado no caso dos sensores de material particulado do mesmo tipo, para os pelo menos dois pontos de referência: um de ar puro e outro de ar extremamente poluído. Sensores eletroquímicos necessitam de um período longo de aquecimento em caso de falta de uso, por exemplo, um mês sem uso requer ao menos 48h de funcionamento para que o sensor estabilize suas leituras.

O segundo sensor de dióxido de carbono testado foi o MH-Z14A<sup>1</sup>, da empresa Winsen, da China. É um sensor ótico com uma retangular na entrada da câmara do laser. Seu custo médio é de USD 21.00, sem impostos.

Figura 4.7: Sensor MH-Z14A, com possibilidade de conexão através da cabos de 7 vias (pitch de 1,5mm), na imagem da esquerda ou para soldar os fios diretamente no módulo, imagem da direita<sup>2</sup>.



Fonte: diyIoT.com

O sensor possui dois tipos de interfaces de pinos, um com uma barra de pinos com pitch de 1,5mm, para cabos com 7 vias, outra para fios que podem ser soldados diretamente na placa (Figura A.17), criando uma opção para escolher qual conector irá ligado ao microcontrolador. São sensores que fazem uma auto calibração uma vez a cada 24h, assumindo que haverá ao menos uma exposição ao ar puro neste período de pelo menos 1h. Com esse parâmetro coletado durante 1h, assume-se como o ar puro de 400ppm de CO<sub>2</sub> no ar. Caso se deseje fazer uma calibração manual, deve-se manter por

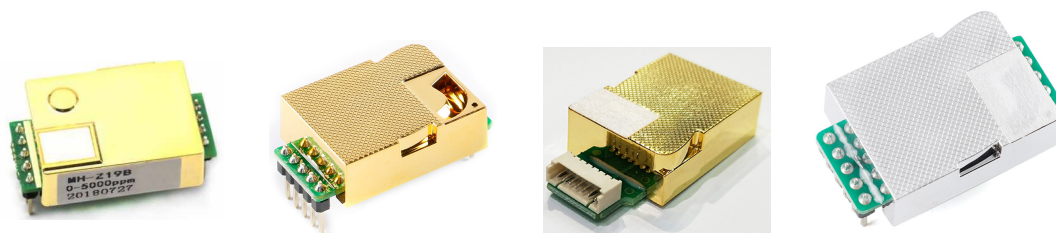
<sup>1</sup><https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z14A.pdf>

<sup>2</sup>[https://diyIoT.com/wp-content/uploads/2021/04/MH-Z14-ESP32-ESP-WROOM-32\\_bb.png](https://diyIoT.com/wp-content/uploads/2021/04/MH-Z14-ESP32-ESP-WROOM-32_bb.png)

pelo menos 20 min o sensor, para então configurar como sendo este o ar puro, de 400 ppm de CO<sub>2</sub>.

Outro sensor da mesma empresa foi testado, o MH-Z19<sup>1</sup> (é possível encontrar diversas variações, ver Figura A.18), um pouco menor, com duas aberturas de ar ao invés de uma para a coleta de informações do ar.

Figura 4.8: Sensor MH-Z19 com diversas variações e formas de conexão, com pinos e cabo de 7 vias.



Fonte: <https://www.google.com/search?q=mh-z19>, acessado em 23/11/2021.

O sensor possui variações de interfaces de pinos, que podem ser escolhidas na hora da compra, um com uma barra de pinos com pitch de 1,5mm, para cabos com 7 vias, outra para conexão padrão pitch de 2,54mm, igual ao dos pinos de uma Arduino Uno. Possuem as mesmas características de auto calibração ou de calibração manual, como o modelo anterior.

A empresa possui outros modelos, com características diferentes, como menor peso e baixo consumo de energia. Também possui sensores com maior acurácia, que podem ser utilizados em ambiente industrial.

Outro sensor testado foi o SCD30, da empresa Sensirion, que possui um custo um pouco mais elevado do que os demais, em torno de USD 35, mais impostos.

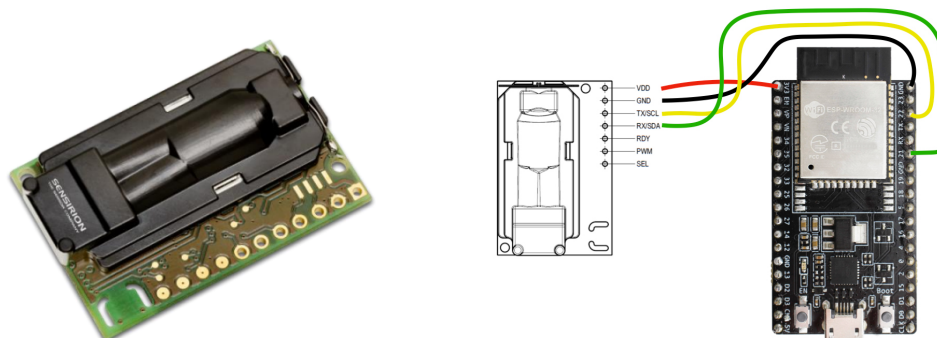
O sensor possui além da medição de dióxido de carbono, sensor integrado de medição de temperatura e de umidade relativa do ar, um combo. A conexão com um microcontrolador é feita através de solda com fios ou barra de pinos com padrão pitch de 2,54mm, em 6 vias. Possui o menor erro de medição anunciado entre os sensores testados e um algoritmo de autocalibração que busca evitar desvios ao longo de sua vida útil, também a mais longa, de 15 anos. Quando medições abaixo de 400ppm são identificadas, aconselha-se a exposição ao ar puro para que a auto calibração seja realizada.

Não foram testados sensores de metal-óxido, como o já citado CCS811, pois eles não realizam a leitura diretamente do dióxido de carbono, mas sim realizando uma esti-

<sup>1</sup>[https://www.winsen-sensor.com/d/files/mh-z19c-pins%26terminal-type-co2-manual\(ver1\\_2\).pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/mh-z19c-pins%26terminal-type-co2-manual(ver1_2).pdf)

<sup>1</sup><https://developer.sensirion.com/archive/tutorials/create-your-own-co2-monitor/>

Figura 4.9: Sensor SCD30 da Sensirion, que possui integrado ao sensor de CO<sub>2</sub> os sensores de temperatura e umidade.



(a) Sensor SCD30.

(b) Exemplo de conexão com um NodeMCU ESP32.

Fonte: Sensirion<sup>1</sup>.

mativa dele com base na leitura de H<sub>2</sub>, medida também conhecida como eCO<sub>2</sub>, ou dióxido de carbono equivalente.

#### 4.1.2.4 Temperatura e Umidade

O maior desafio em termos de hardware foi o sensor de temperatura e umidade relativa do ar. Diversos projetos, artigos, páginas da internet produzem a sensação de que é muito fácil, prático e barato fazer a medição destas variáveis ambientais com sensores de baixo custo. Porém realizar a leitura de forma prática e barata não se mostrou uma tarefa trivial.

O primeiro sensor testado foi um DHT11<sup>2</sup>, que possui um sensor de umidade capacitivo e um termistor para medir o ar circundante, É muito utilizado em projetos com Arduino. O sensor, apesar de ser bastante popular, possui uma faixa de medição que não permite leituras com valores abaixo de 0 °C, o que torna ele bastante restrito para climas frios, como é o caso da região sul do Brasil e locais com altas altitudes. Possui grande oferta em diversas lojas físicas e virtuais, com preço médio (em 2021) variando em torno de R\$13. Possui conexão através de 4 pinos com pitch de 2,54mm e os dados são enviados através de um único pino. O sensor possui um controlador de 8 bits que envia os dados no seguinte formato de 5 segmentos:

- 8 bit integral UR data +;
- 8 bit decimal UR data +;

<sup>2</sup>[https://www.filipeflop.com/img/files/download/Datasheet\\_DHT11.pdf](https://www.filipeflop.com/img/files/download/Datasheet_DHT11.pdf)

- 8 bit integral T data +;
- 8 bit decimal T data +;
- 8 bit check sum = 40 bits.

Como existem bibliotecas prontas para esta leitura, não há um fator de complexidade a ser considerado.

A fim de expandir a faixa de medição possível, foi testado o sensor DHT22 ou AM2302, que é muito semelhante ao DHT11. O sensor também é bastante popular, possui uma faixa de medição mais larga e permite leituras com valores abaixo de 0 °C. Possui grande variedade de opções de compra, com preço médio (em 2021) um pouco mais elevado, variando em torno de R\$ 37. Possui o mesmo padrão de conexão e comunicação que o DHT11, com biblioteca própria para implementação. Ambos dois módulos necessitam de um resistor na configuração de leitura dos dados, mas cada fabricante do módulo indica qual resistor deve ser associado na montagem. Alguns módulos, como o vendido pela Sparkfun, já possui um resistor de 4,7 k integrado para a comunicação I<sub>2</sub>C.

Um pouco mais barato, em torno de R\$28 (em 2021), foi testado o sensor HTU21D/F, da TE Connectivity (Estados Unidos). Ele possui uma maior faixa de leitura, menor consumo de energia e é vendido em módulos com pinagem com pitch de 2,54 mm.

Os módulos sobre os quais são montados podem também necessitar de resistores ou jumpers para a configuração de leitura dos dados, mas cada fabricante do módulo indica qual resistor deve ser associado na montagem ou jumper acionado.

No mesmo estilo de comunicação I<sub>2</sub>C foi testar um sensor mais popular, da Texas Instruments (Estados Unidos), o HDC1080.

O sensor é bastante popular e comumente encontrado em módulos com associação com outros sensores, como CCS811, como já comentado, um sensor de TVOC. O valor médio é semelhante aos demais do mesmo tipo, em torno de R\$32 (em 2021). Este sensor possui vasta documentação, o que auxiliou no entendimento do comportamento, bem como manual de aplicação do sensor bastante detalhado<sup>1</sup>.

Já em sensores SMD, foram testados dois modelos, com características um pouco diferentes. O SHTC3<sup>2</sup>, da Sensirion (Suíça), possui larga faixa de detecção e ótima precisão na faixa de leitura desejada.

Este tipo de sensor deve ser incorporado a um projeto de placa de circuito im-

---

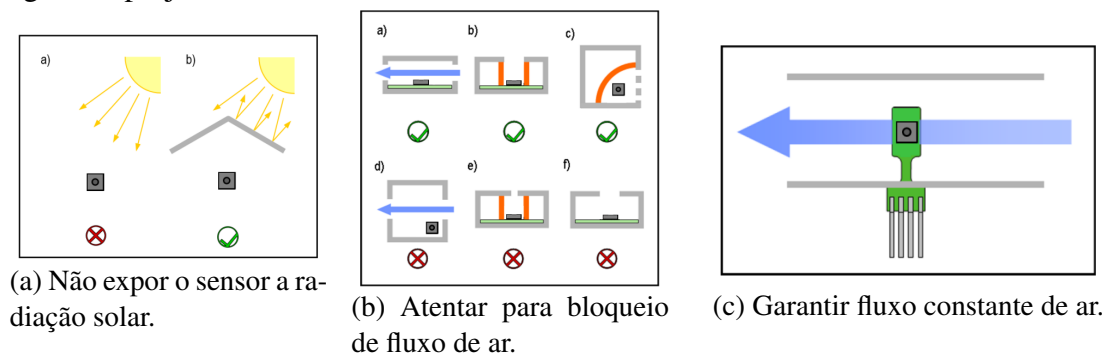
<sup>1</sup><https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf?ts=1654356409436>

<sup>2</sup>[https://sensirion.com/media/documents/643F9C8E/6164081E/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_SHTC3\\_Datasheet.pdf](https://sensirion.com/media/documents/643F9C8E/6164081E/Sensirion_Humidity_Sensors_SHTC3_Datasheet.pdf)

presso, uma vez que ele não vem montado sobre um módulo, necessitando de um circuito auxiliar para poder ser implementado. O custo é em torno de USD 2.00 (em 2021), mais impostos, sendo mais caro para uma unidade e mais barato para dezenas ou centenas. Não é possível comparar diretamente o valor com sensores que já vem com o módulo, pois esta montagem irá agregar valor ao sensor. A Sensirion fornece toda a documentação necessária para isso, tanto do desenho em CAD do sensor, quanto às bibliotecas para leitura e códigos de exemplo, incluindo para Arduino.

Assim como a Texas Instruments, a Sensirion possui um interessante guia de projeto de aplicação de sensores, especificamente o de temperatura e umidade (Fonte: Design Guide V1, já citado), detalha a forma mais eficiente para este tipo de medição. Seguir orientações, como mostra a Figura A.26c, auxilia na tarefa de informações mais precisas serem extraídas dos sensores.

Figura 4.10: Considerações que devem ser observadas no projeto do monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar, como não expor a radiação solar direta ao sensor (a), projetar uma condição de fluxo de ar constante no sensor (Figuras (b) e (c)), conforme o guia de projeto.



Fonte: Design Guide V1, Sensirion.

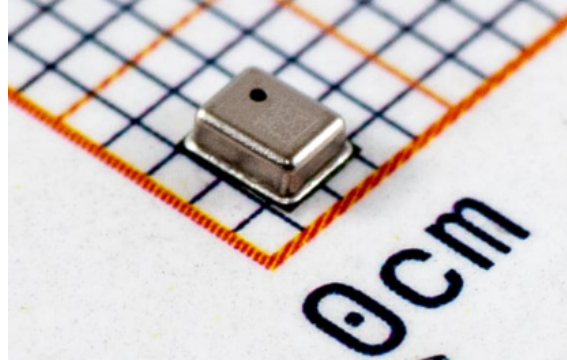
O fluxo de ar deve ser constante sobre o sensor e passar diretamente sobre ele, fazendo com que as condições locais no sensor se equilibrem rapidamente com as condições ambientais. Paredes, obstáculos para o fluxo de ar que passará pelo sensor, devem ser cuidadosamente analisados no projeto, a fim de não termos um volume de ar “preso” sobre o sensor, perdendo a informação desejada que é a do meio ambiente.

Com o interesse de ter juntamente com umidade e temperatura a pressão atmosférica, foi testado outro sensor, o SPL06-001<sup>1</sup>, da Goertek (China) (ver Figura A.27). É um sensor com interface I<sub>2</sub>C, que poderia auxiliar na compreensão das variações de outros sensores, como o de material particulado e dióxido de carbono. Possui uma faixa de

<sup>1</sup>[https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/2101201914\\_Goertek-SPL06-001\\_C2684428.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/2101201914_Goertek-SPL06-001_C2684428.pdf)

leitura de pressão atmosférica entre 300 e 1100 hPa (ou +9000m e -500m em relação ao nível do mar). A alimentação de energia é entre 1.7 e 3.6V e seu consumo é 60 $\mu$ A.

Figura 4.11: Sensor de pressão atmosférica SPL06-001, da Goertek.



Fonte: Goertek.

#### 4.1.3 Caixa de condicionamento

O acondicionamento de um equipamento para medição de poluentes ou variáveis ambientais deve ser bastante estudado antes de se implementar uma solução definitiva, tendo em mente características que devem tentar ser atendidas da melhor forma possível:

- Material adequado em relação a durabilidade;
- Exposição a intempéries;
- Capacidade de confeccionar (de forma própria ou por terceiros);
- Atendimento aos requisitos de cada sensor para a correta leitura das variáveis desejadas;
- Forma de fixação ou carregamento (se for vestível);
- Custo benefício;
- Praticidade de montar e de manutenção;
- Praticidade em comunicação, tanto por cabo (firmware) ou sem fio.

Nas primeiras tentativas, atendendo ao custo benefício frente a necessária curva de aprendizagem, foram utilizadas caixas de passagem de energia elétrica, muito comuns no mercado e em diversos tipos e formatos. Os valores destas caixas variam bastante, entre R\$30 e R\$80, conforme fabricante e modelo. Uma das necessidades ao utilizar este tipo de solução é a perfuração da caixa para aberturas de acondicionamento de sensores e cabeamento, o que pode gerar alguma dificuldade, bem como a fixação, que normal-

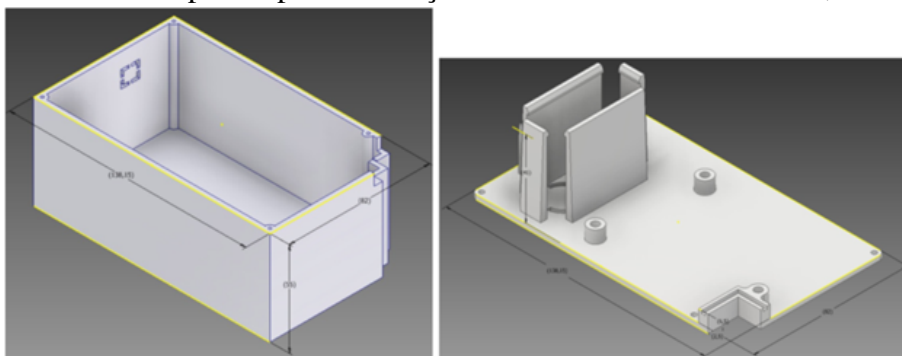


mente é pensada pelos fabricantes como definitiva. As primeiras montagens possuem as características como pode ser visto na Figura A.8.

Nas Figura A.29 podem ser observados os estudos realizados com o auxílio de ferramentas de desenho tridimensional e de renderização, que auxiliaram na redução de custos com a visualização antecipação de sólidos muito realísticos do que deveriam se tornar os projetos, antes de se gastar recursos com a confecção física dos mesmos.

Após os testes iniciais e as definições da placa de integração, como mostra a Figura A.29, a possibilidade de se desenhar uma caixa de acondicionamento dedicada ao projeto pode ser executada, de forma a tentar prever todas as variante que podem afetar o funcionamento.

Figura 4.12: Desenho prévio para confecção caixa de acondicionamento, base e tampa.



Fonte: Autor.

Na Figura A.30 mostra os estudos possíveis e que foram executados para simular opções de características e variações da caixa de acondicionamento e outros itens do projeto. Foram simuladas variações com display de visualização de dados incorporadora e sem, com e sem duto de fluxo de ar, a fim de se adicionar um aquecimento do ar na entrada, com sensores de fabricantes diferentes e modelos diferentes e do posicionamento das caixas em infraestruturas simuladas, como paredes e colunas.

Na Figura A.31 os as caixas que foram confeccionadas pela empresa Eplax Soluções e Tecnologia<sup>1</sup> que usaram técnicas de confecção de baixo volume de unidades com colagem de elementos, aparafusamento, dobragem de plástico e usinagem das peças. Esse tipo de serviço permite uma maior precisão dos engates e rigidez do material.

Alguns pontos são importantes de serem salientados quanto a caixa de acondicionamento e que podem impactar em replicar o projeto:

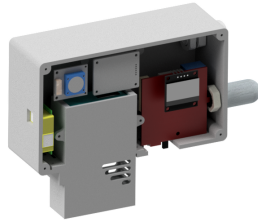
- Para cada lote de caixas que serão encomendadas com uma empresa terceirizada, deve considerar que além das caixas, deve-se pagar o projeto de fabricação da caixa,

<sup>1</sup><https://eplax.com.br/>

Figura 4.13: Estudo pré-confecção da caixa de acondicionamento com o auxílio de renderização, a fim de se obter mais informações através da percepção visual do equipamento final. Opções de fixação em paredes ou colunas (a). Opções com e sem o duto de circulação de ar (c) e (d). Opções com display (todas), para visualização de informações diretamente na caixa.



(a) Estudo de fixação.



(b) Renderização para análise.



(c) Com duto de ar.



(d) Sem duto de ar.

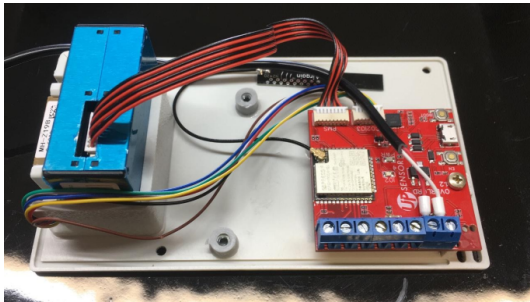
Fonte: Autor.

que é necessário para que o projeto idealizado seja exequível pelos processos de produção da empresa;

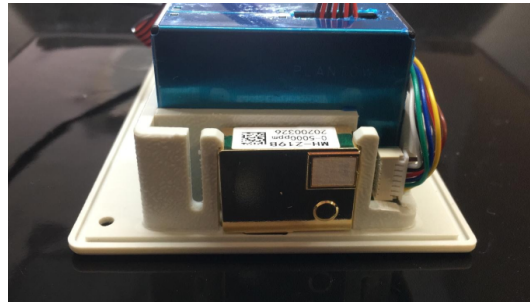
- Pequenas quantidades de caixas podem tornar inviável o custo, pois todo o custo do projeto de adaptação para fabricação tem que ser diluído pelo número de caixas a serem produzidas, quanto maior o número de caixas, mais baratas elas ficarão individualmente;
- O tempo de execução dos serviços terceirizados é muito diferente de se executar diretamente na impressora 3D do laboratório, as vezes pode-se ficar semanas na fila para a análise do projeto e mais algumas entre a aprovação do projeto e a entrega do lote de caixas;
- Deve-se considerar ainda o tempo entre o lote a ser fabricado e a amostra a ser aprovada, que normalmente é enviada por algum transporte mais econômico, como os Correios, e são mais algumas semanas a se considerar de tempo no cronograma do projeto;
- Cada sensor possui características de funcionamento, alguns de gases podem ser sensíveis a materiais utilizados na caixa, como os resíduos voláteis do próprio material ou colas que podem ter sido utilizadas, o que pode afetar a leitura dos dados dos sensores.

Na Figura A.32 os as caixas que foram confeccionadas pela empresa Eplax, já com atualizações para a versão final deste projeto.

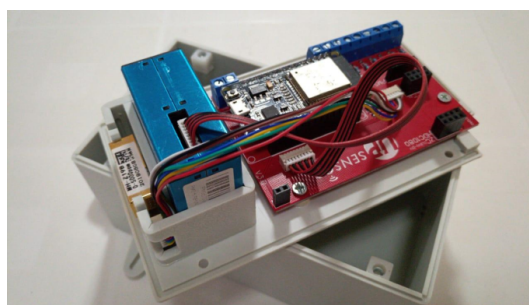
Figura 4.14: Montagens de sensores, placa, cabos de conexões entre sensores e placa e entre as partes da caixa, tampa e fundo.



(a) Fixação da penúltima versão de placa de aquisição de dados na caixa confeccionada pela Eplax.



(b) Fixação através de pressão, sem o uso de parafusos. Dourado é o sensor MH-Z19 e azul o PMS5003.



(c) Visão geral da montagem com NodeMCU, semelhante a versão a ser realizada com impressão 3D.

Fonte: Autor.

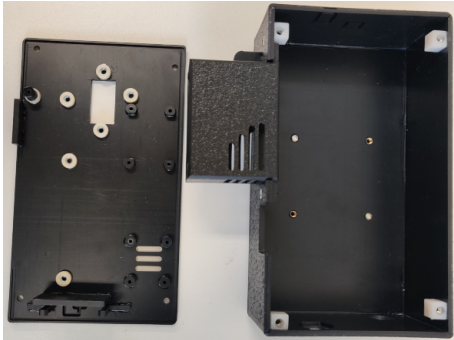
## 4.2 HARDWARE COM FABRICAÇÃO EM LABORATÓRIO

Os trabalhos prévios desenvolvidos mostraram que o uso de sensores requer qualidade na fabricação do sistema de aquisição, bem como técnicas físicas para isolamento do ambiente que se deseja mensurar. Não deve-se permitir grande influência de corpos ou materiais próximos, ou mesmo do próprio equipamento de medição.

Inicialmente foram utilizadas placas de aquisição de dados Arduino Uno e diversos elementos, como será mostrado no capítulo de Resultados. Para a parte de comunicação foram utilizados módulos de comunicação do tipo ESP-01, depois passando para ESP8266 em um módulo NodeMCU e posteriormente um módulo ESP32, embarcado em uma placa de circuito impresso.

Após o desenvolvimento do hardware com suporte de serviços de terceiros, foram elencados os itens de hardware que seriam possíveis de serem confeccionados com o auxílio de laboratórios de escolas, universidades ou espaços maker. Porém, o mais importante foi salientar o que seria muito difícil de ser executado de forma autoral, sendo este

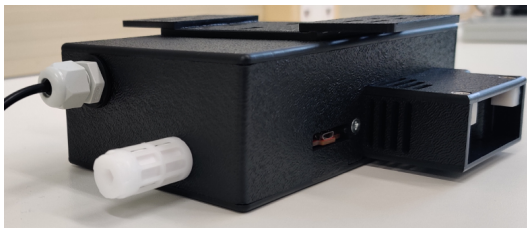
Figura 4.15: Nova versão de caixa, agora com as correções para a versão final, sendo que foi projetada de forma modular, podendo ter ou não alguns elementos, como duto externo para fixação futura de aquecimento do ar, placa para fixação por parafuso na parede e esta por encaixe na caixa e suportes para diferentes modelos de sensores, como PMS5003, PMS7003 ou SPS30.



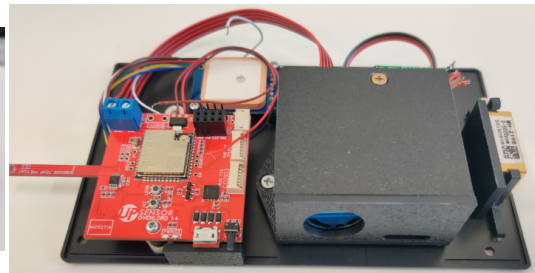
(a) Tampa e fundo com porcas fixadas por cola na caixa.



(b) Placa para fixação permanente na parede e engate na caixa e duto de ar para aquecimento embaixo.



(c) Visão do dutos de ar, fixação do cabo de energia e proteção do sensor de umidade e temperatura.



(d) Visão aberta com a opção de inserção de módulo de GPS (quadrado branco acima na esquerda).

Fonte: Pedro Souza.

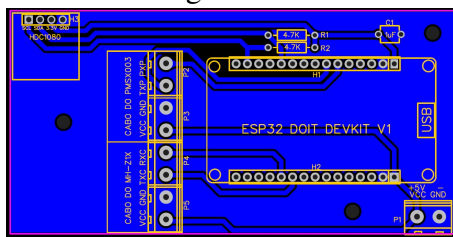
itens os destacados:

- i Sensoriamento de temperatura e umidade sem o uso de um módulo ou sensor já encapsulado;
- ii Microcontrolador sem o uso de um "NodeMCU", soldado diretamente na pcb;
- iii Fixação de sensores sem o uso de parafuso ou ou elementos do tipo, sendo difícil uma impressão 3D obter a rigidez necessária para a fixação por pressão de hastes;

A placa de circuito impresso teve pequenas modificações para o uso de elementos do tipo pth, conforme mostra a Figura B.1. É possível a conexão direta com módulos como os das Figuras A.22 ou A.23, além do uso de outras montagem desse tipo de sensor, como os sensores encapsulados SHT20, SHT30 e outros similares<sup>1</sup>, ver Figura B.2.

<sup>1</sup><https://pt.aliexpress.com/item/4000921395488.html>

Figura 4.16



Placa de integração para uso com NodeMCU ESP32.

Fonte: Gustavo Selbach.

Figura 4.17: Diversos sensores da Sensirion, encapsulados para uso em solo ou expostos, ideal para que o fluxo de ar contínuo sobre o sensor seja atendidos.



Fonte: Aliexpress.com.

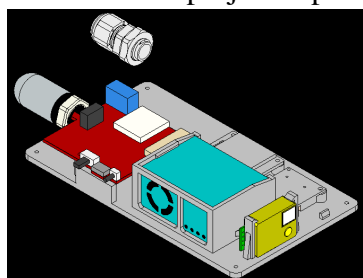
Para o sensoriamento de temperatura e umidade a solução encontrada pode fazer uso dos prensa cabos para a fixação do cabo, como se verá na Figura B.8, e a fixação através de bornes com o uso de uma chave de fenda ou cruz.

A caixa de condicionamento não sofreu muitas alterações, sendo que as maiores dificuldades se encontraram na precisão para o fechamento e alinhamento de tampas e engates plástico-plástico, devido a própria natureza das impressoras de filamento de baixo custo. A primeira etapa foi desenhar a caixa para atender as características de uma impressora 3D e as demandas do projeto, ver Figura B.3.

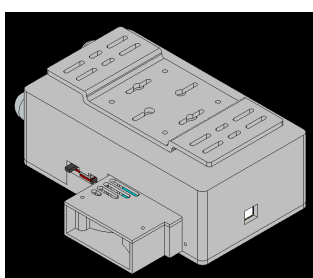
Após os testes iniciais e as definições da placa de integração, ver Figura B.3, a possibilidade de se desenhar uma caixa de acondicionamento dedicada ao projeto pode ser executada, de forma a tentar prever todas as variante que podem afetar o funcionamento.

Um exemplo de impressão da caixa de acondicionamento pode ser visto na Figura B.4, onde a caixa foi impressa em duas metades, que se encaixam de forma a acondicionar todos os elementos, de forma semelhante ao que foi utilizado nas caixas fabricadas por terceiros, inclusive com os engates rápidos.

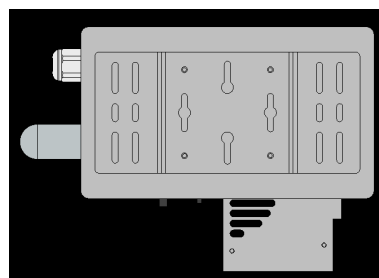
Figura 4.18: Projeto de caixa de acondicionamento. As imagens mostram como foi feito o estudo para a disposição dos elementos, peças de fixação e cabeamento a fim de atender as demandas do projeto específico.



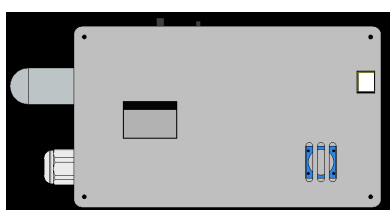
(a) Estudo da disposição dos elementos.



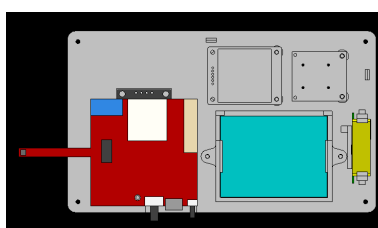
(b) Estudo das áreas livres para sensores.



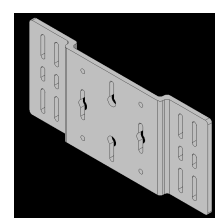
(c) Estudo das áreas livres para sensores.



(d) Estudo das áreas livres para sensores.



(e) Estudo da fixação.



(f) Estudo da fixação.

Fonte: Pedro Souza.

### 4.3 ENERGIA

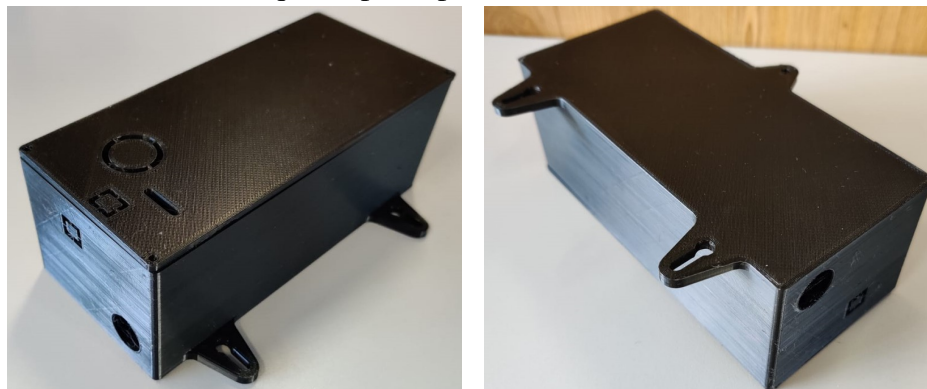
A fonte de energia para o equipamento foi sendo alterada à medida que foi sendo alterada a placa de circuito impresso. A primeira versão da placa, com a utilização de uma Arduino Uno, era alimentada através de um cabo com conector USB-B para a placa e USB-A (tradicional) para a extremidade da fonte de energia, ver Figura B.5.

O cabo é utilizado tanto para a programação do microcontrolador quanto para a energização do sistema, durante a programação a própria USB do computador alimenta o sistema e para a instalação nos ambientes uma fonte de alimentação de celular poderia ser escolhida, atentando para os valores de tensão e corrente elétrica serem atendidos. Para os testes foi utilizada uma fonte de alimentação de corrente contínua com 9V e 1A, com um plug P4 macho 5,5 x 2,1mm. Preço médio da fonte é de R\$20 (em 2021), podendo variar conforme fornecedor e características elétricas, ver Figura B.6<sup>1</sup>.

Da mesma forma que utilizado para a alimentação da Arduino UNO, a fonte a ser escolhida deveria atender aos requisitos de tensão elétrica e corrente elétrica do sistema. Com a adição da base do NodeMCU, foi acrescida a possibilidade de uma alimentação

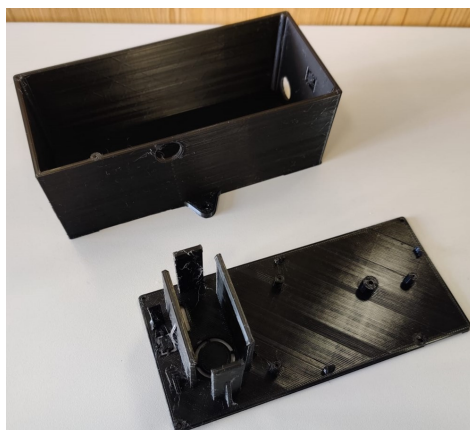
<sup>1</sup><https://www.filipeflop.com/produto/fonte-dc-chaveada-9v-1a-plug-p4/>

Figura 4.19: Uso de impressão 3D para a confecção da caixa de acondicionamento. Figuras (a) e (b) com imagens de caixas montadas e Figuras (c) e (d) com as partes impressas inferior e superior separadas. Pode-se notar que os engates rápidos para os sensores foram mantidos, bem como o destaques rápidos para os sensores também.



(a)

(b)



(c)

(d)

Fonte: Pedro Souza.

dedicada, assim como na Arduino, com o plug P4.

A utilização da fonte de alimentação dedicada se manteve no projeto de placa confeccionada e para facilitar a conexão, foi utilizado um plug P4 fêmea para ser fixado na caixa do sistema através de rosca e então o plug ficaria exposto do lado externo da caixa. O custo médio deste componente é bastante heterogêneo, variando entre R\$3 e R\$20 (em 2021). foram testados diversos modelos (Figura B.7 e a qualidade afetou muito o sucesso no fornecimento de energia quando pequenas movimentações faziam com que houve perda de contato efetivo e o sistema desligava.

Esta solução não se mostrou muito eficiente e outra solução foi testada para as placas de circuito impresso, a fixação da fonte diretamente em um barramento de pinos.

Com a utilização do prensa cabo e a fixação do cabo de alimentação em barra de

Figura 4.20: Cabo de alimentação e programação para a placa Arduino Uno, na esquerda a ponteira com conector USB-A e na direita a ponteira com conector USB-B.



Fonte: Autor.

Figura 4.21: Fonte de alimentação para Arduino UNO, com plug P4 compatível.



Fonte: Autor.

pinos da placa, o cabo não soltou mais com pequenas trações, como ocorria antes e o fornecimento de energia para a placa não teve mais problemas. A solução é de simples implementação sendo suficiente um orifício de tamanho adequado com o fio e a armadura do prensa-cabo, ver Figura B.8.

#### 4.4 COMUNICAÇÃO

A comunicação sem fio sempre se deu, desde a primeira versão, com o uso dos módulos de comunicação da Expressif, começando com os módulos simples, como ESP-01, passando pelos NodeMCU ESP8266, NodeMCU ESP32 e ESP32-WROOM-32u (integrada na placa), ver Figura B.9.

A utilização dos módulos como o ESP-01 é bastante comum com placas Arduino, porém a necessidade de que se fazer um divisor de tensão para que o nível de 3.3V da ESP-01 seja compatível com o de 5V.

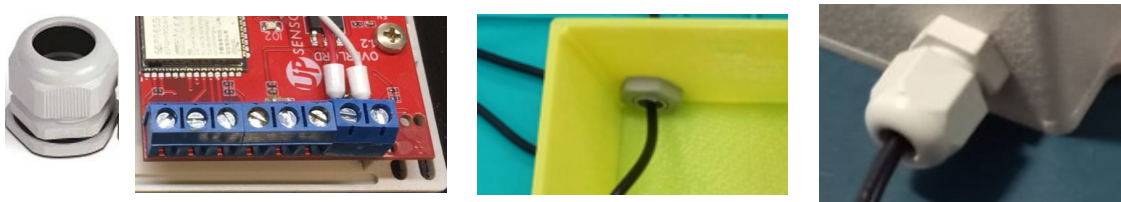


Figura 4.22: Plug P4 fêmea, para fixação interna na caixa e encaixe externo para a fonte de energia.



Fonte: Autor.

Figura 4.23: Peça do prensa cabo (a), fixação do cabo de alimentação em barra de pinos da placa, através de parafuso (b), fixação do prensa cabo pelo lado interno (c) e lado externo (d) para a fixação do cabo na caixa, sem o risco de ao puxar ser desconectado da placa.



Como já comentado no item A.1 a introdução do NodeMCU acaba com este problema, unindo a antena de comunicação com o microcontrolador.

Como pode-se observar nas Figuras B.9a e B.9b, as antenas são impressas na própria placa (linha sinuosa dourada). É um método de confecção de antenas embarcadas, porém podem não ser muito eficientes, o que causa perda de conectividade quando o sinal de Wi-Fi não for potente, com valores de intensidade de sinal menor do que -85dBm. Para solucionar esta questão é possível substituir os módulos que permitem a implementação de uma antenas externas de diversos tipos, através de um conector do tipo IPEX, como pode ser visto em exemplos na Figura B.10.

## 4.5 SOFTWARE

O desenvolvimento do software se deu em três partes:

- Firmware, software embarcado para a coleta de dados pelos sensores, com a utilização da IDE Arduino, amplamente difundida e gratuita;
- Software para o armazenamento dos dados em nuvem, em bancos de dados relacional;
- Software para visualização e análise dos dados adquiridos, visualização de séries temporais e alertas de níveis de poluentes, sendo a plataforma Grafana previamente

Figura 4.24: Antenas de comunicação com módulos simples, como ESP-01 (a), passando pelos NodeMCU ESP8266 (b), NodeMCU ESP32 (c) NodeMCU ESP32u (d) e ESP32-WROOM-32u (a ser integrada na placa).

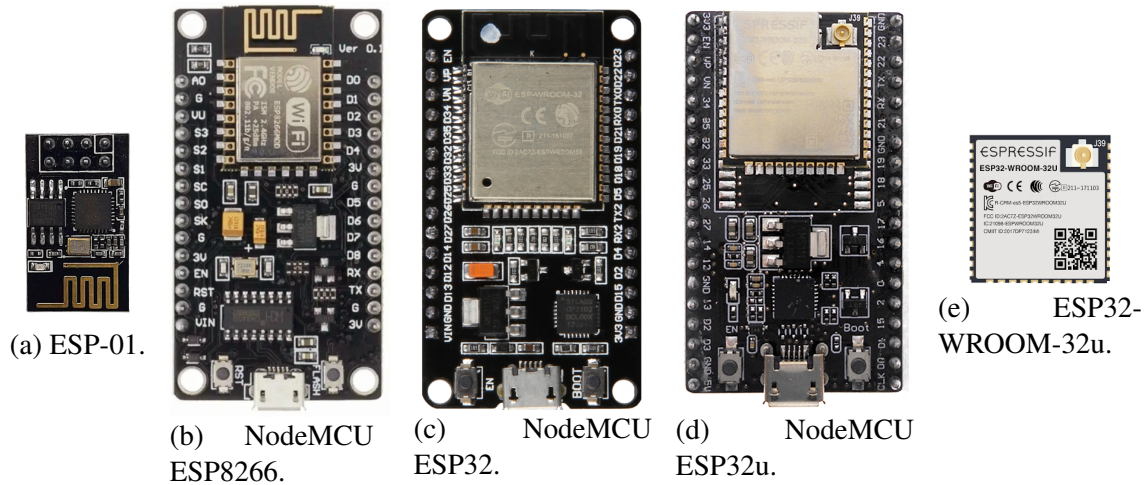


Figura 4.25: Tipos de antena de comunicação não impressas na ESP32 podem ser adicionadas para melhorar a comunicação Wi-Fi com a internet. Antenas do tipo fita (a), sólidas (b) e com uma montagem em uma caixa (c).



Fonte: Autor.

escolhida.

#### 4.5.1 Firmware

Foi utilizada inicialmente a IDE da própria Arduino para a programação das placas, com a utilização de bibliotecas encontradas na internet ou na própria IDE de forma bastante diversificada. O detalhamento do firmware desenvolvido pode ser encontrado no adiante, em 5.4. A segmentação do desenvolvimento se deu nas seguintes partes: segmentação do software embarcado: bibliotecas setup comunicacao sensores

- Busca de bibliotecas que facilitassem o uso de forma open software;

- Desenvolvimento de um setup para os ajustes de hardware escolhido, bibliotecas escolhidas e direcionamento para servidor em nuvem;
- Desenvolvimento de comunicação com servidor com o uso de bibliotecas de uso na forma de open software.
- Desenvolvimento de lógica de captura de dados, aferição de validade dos mesmos, construção de médias de valores e associação com horário de captura.

#### 4.5.2 Em nuvem

O sistema em nuvem é composto por vários componentes de software que interagem entre si. A transferência de dados dos dispositivos até a nuvem é feita através do protocolo HTTP. A aquisição dos dados é baseada em um algoritmo desenvolvido na linguagem de programação PHP. O armazenamento dos dados é feito em um banco de dados PostgreSQL, utilizando a extensão TimescaleDB. A interpretação e visualização dos dados é feita com o uso do software Grafana e, também, através de programas desenvolvidos com a linguagem PL/pgSQL, PHP e Javascript. As tecnologias utilizadas estão relacionadas a seguir:

- Servidor Linux CentOS 7.1 64 bits hospedado na nuvem;
- Linguagem de programação PHP 7.2;
- Linguagem de programação Javascript;
- Banco de dados Postgresql 11;
- Extensão de banco de dados TimescaleDB 1.5.1;
- Aplicativos baseados em Javascript: Highcharts e Leaflet;
- Aplicativo de visualização de dados Grafana.

O armazenamento, análise e visualização dos dados em nuvem foi realizado com as ferramentas descritas anteriormente. Todos os dados recebidos pelos sensores foram alocados em um banco de dados temporal, basicamente uma grande tabela na nuvem de computação. A partir do armazenamento, cada variável poderia sofrer uma nova análise, além da que já havia sido feita pelo software embarcado.

Teoricamente todas as variáveis poderiam sofrer essa análise no hardware de aquisição, porém, em alguns casos de funcionamento inesperado, sendo o dado filtrado já na origem, poderia impedir uma intervenção para correção do mesmo, pois ele nunca chega-

ria ao conhecimento de quem operasse o sistema.

O desenvolvimento do algoritmo de importação de dados foi feito utilizando a linguagem de programação PHP. Os dados lidos são inseridos no banco de dados utilizando dois comandos, como, exemplo:

- O primeiro comando insere os dados na tabela principal, onde todos os dados históricos estão armazenados.

```
INSERT INTO records (device_code,sensor_code,payload,ts)
VALUES (802010,1,23','12/08/2019 14:23:50")
```

- O segundo comando insere os dados na tabela de últimos valores recebidos, onde está apenas o último dado reportado para este equipamento. O armazenamento do último registro é importante para evitar carregar toda a tabela de dados históricos na memória para ler apenas o último registro, aumentando assim a velocidade das consultas sobre as últimas leituras efetuadas pelo dispositivo.

```
INSERT INTO records_latest (device_code,sensor_code,payload,ts)
VALUES (802010,1,23','12/08/2019 14:23:50')
ON CONFLICT(device_code,sensor_code) DO
UPDATE SET ts = '12/08/2019 14:23:50',
payload = '23"
```

A partir dos dados inseridos no banco de dados, as variáveis recebem o primeiro tratamento, com os cortes de limite superior e inferior, conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tabela de tratamento inicial de variáveis, limites.

Variável	Valor Mínimo	Valor Máximo
Umidade Relativa do ar	5%	100%
Temperatura	-10°C	50°C
Velocidade do vento	0m/s	60m/s
Chuva	0mm	200mm
CO <sub>2</sub>	396ppm	5000ppm
Radiação Ultravioleta	0	15
PM <sub>2.5</sub>	0µg/m <sup>3</sup>	1.000µg/m <sup>3</sup>
PM <sub>10</sub>	0µg/m <sup>3</sup>	1.000µg/m <sup>3</sup>
VOC	0ppb	60.000ppb

Fonte: Autor

As justificativas dos limites superior e inferior das variáveis são particulares a cada tipo de medição e possuem as seguintes justificativa:

- umidade - valores abaixo de 1% e acima de 100% não são possíveis fisicamente de

existir;











- temperatura - registros de temperatura abaixo de  $-10^{\circ}\text{C}$  não são esperados devido aos valores históricos registrados nos locais instalados e valores acima de  $50^{\circ}\text{C}$  devem ser erro de leitura ou algum fator que esteja influenciando, como a caixa do sensor estar exposta a radiação solar;
- vento velocidade - registros de ventos com velocidade acima de  $00\text{ m/s}$  não são esperados devido aos valores históricos registrados nos locais instalados;
- chuva - valores de chuva acumulada horária não são esperados acima de  $00\text{mm}$  devido aos dados históricos registrados nos locais instalados;
- $\text{CO}_2$  - valores de abaixo de  $396\text{ ppm}$  são considerados erro, pois os sensores possuem autocalibração semanal, sendo que há a necessidade de ser instalado em local que seja ventilado com ar externo ao menos uma vez por semana, e este valor é utilizado pelo sensor como referência a calibração ( $400\text{ppm}$  ar externo) e o valor máximo é o de próprio limite de escala do sensor;
- uv - o sensor de radiação ultravioleta possui uma escala linear que foi calculada com limite de escala de valor 15;
- $\text{PM}_{2.5}$  - o valor máximo de escala do sensor é de  $1.000\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;
- $\text{PM}_{10}$  - o valor máximo de escala do sensor é de  $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;
- VOC - o valor máximo de escala do sensor é de  $60.000\text{ ppb}$ .

A estrutura do banco de dados desenvolvida para o armazenamento dos dados de leitura dos dispositivos está representada na Figura 4.26. Ela permite registrar leituras de dados (i.e. temperatura um sensor) de um dispositivo físico e, finalmente, atribuir a característica de tempo a esta leitura.

- `device_code`: representa o código único de um dispositivo físico. Um dispositivo físico, uma caixa com placa de integração, placa de comunicação, sensores e fonte;
- `sensor_code`: representa o tipo de dado armazenado em uma determinada linha do banco de dados, associando o código a uma variável, como por exemplo: temperatura, umidade, dióxido de carbono, etc.;
- `payload`: representa o valor lido de um dispositivo que será armazenado em uma variável, representada pelo `sensor_code`;
- `ts`: representa o dia, mês, ano e hora do registro.

A estrutura do banco de dados desenvolvida para o armazenamento dos dados

Figura 4.26: Estrutura de armazenamento dos dados.

Columns							+
	Name	Data type	Length	Precision	Not NULL?	Primary key?	
 	id	bigint			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	
 	device_code	integer			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	
 	sensor_code	smallint			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	
 	payload	real			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	
 	ts	date			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	

Fonte: Guilherme Balbinot.

dos dispositivos representada na Figura 4.27. Ela permite registrar informações sobre um dispositivo físico.

- id: índice de uso interno para gestão dos registros;
- device\_code: representa o código único de um dispositivo físico. Um dispositivo físico pode ser, por exemplo, um piezômetro, uma estação pluviométrica, um sensor;
- client\_id: representa o cliente ou projeto que este dispositivo pertence;
- devices\_type\_id: representa o tipo de dispositivo. Por exemplo: medidor de vazão, estação meteorológica, piezômetro;
- description: representa a descrição do dispositivo.
- cidade\_id: representa o identificador número da cidade onde está localizado o dispositivo;
- localização: representa as coordenadas geográficas em formato DD (graus decimais);
- IP: representa o endereço IP do dispositivo físico;
- SSID: representa a rede sem fio a qual o dispositivo físico está conectado;
- modified: representa a data na qual se modificou o registro do dispositivo.

### 4.5.3 Visualização

Foram coletados dados desde a instalação em unidades básicas de saúde (ambiente externo, 2017), na UFRGS (PGIE e Escola de Engenharia) tanto externo quanto interno, em uma escola da grande Porto Alegre (maternal, ensino fundamental, ensino médio e

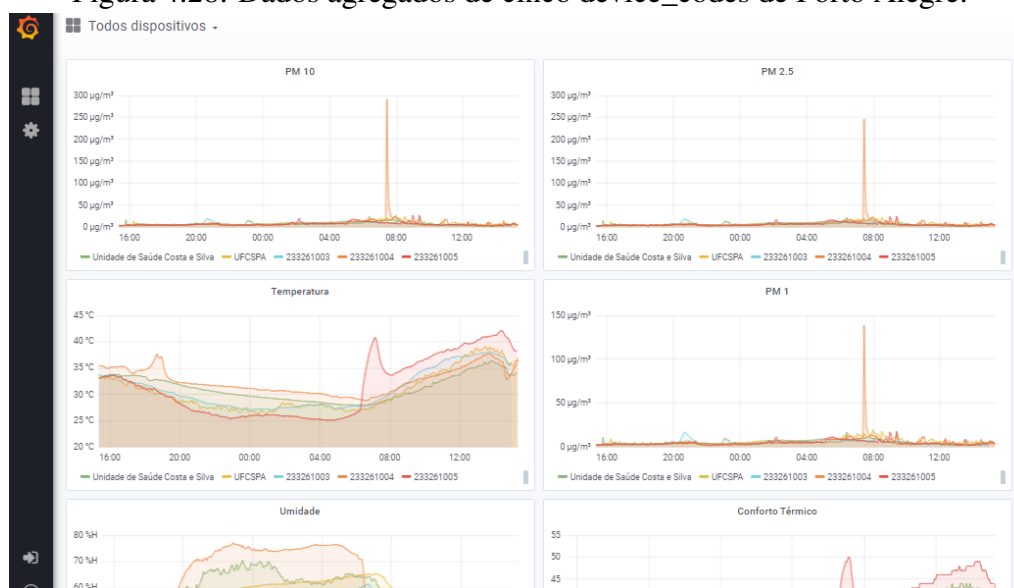
Figura 4.27: Estrutura de armazenamento dos dados dos dispositivos.

Columns						
Name	Data type	Length	Precision	Not NULL?	Primary key?	
<input checked="" type="checkbox"/> id	integer			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	
<input checked="" type="checkbox"/> device_code	integer			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	
<input checked="" type="checkbox"/> client_id	smallint			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	
<input checked="" type="checkbox"/> devices_type_id	smallint			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	
<input checked="" type="checkbox"/> description	character		255	<input type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> No	
<input checked="" type="checkbox"/> cidade_id	smallint			<input type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> No	
<input checked="" type="checkbox"/> localizacao	character		25	<input type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> No	
<input checked="" type="checkbox"/> ip	character		15	<input type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> No	
<input checked="" type="checkbox"/> ssid	character		30	<input type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> No	
<input checked="" type="checkbox"/> modified	timestamp without time zone			<input checked="" type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> No	

Fonte: Guilherme Balbinot.

laboratórios). O software Grafana foi utilizado por ser gratuito e de fácil configuração, com a possibilidade de exibir os dados agregados em um único gráfico, como nas Figuras 4.28 e 4.29.

Figura 4.28: Dados agregados de cinco device\_codes de Porto Alegre.



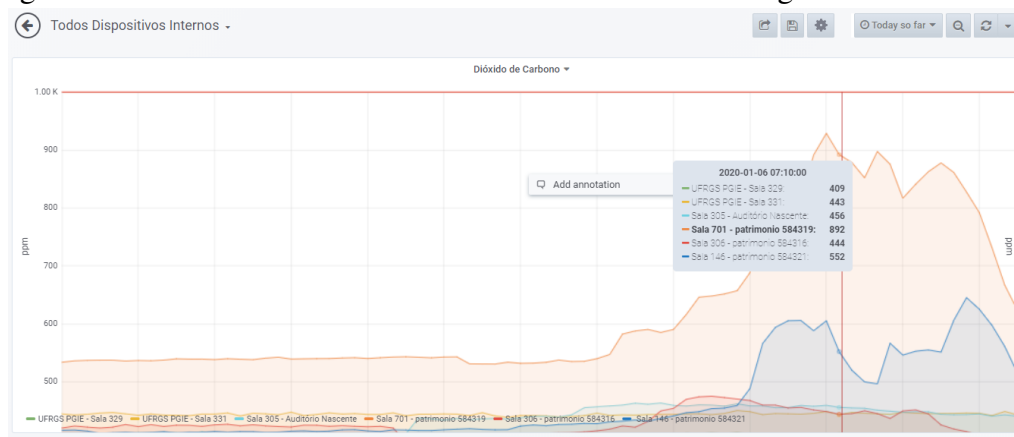
Fonte: Autor.

A visualização atual dos dados pode ser georreferenciada e utilizando mapas para facilitar o acesso aos dados, como mostra a Figura 4.30.

Outra visualização é de uma mapa menor, com o histórico de cada variável em forma de gráfico de barras para um período de 24h, com uma barra para a média de valor de cada variável, como mostra a Figura 4.31. No canto direito de cada histórico há os valores máximo e mínimo que a variável atingiu em leituras individuais no período de 24h.

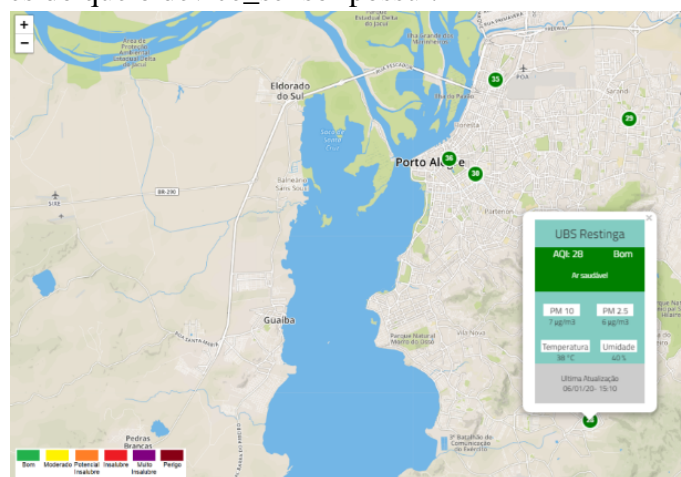
Uma versão mobile para Android foi desenvolvida a fim de facilitar a instala-

Figura 4.29: Sensores de dióxido de carbono na Escola de Engenharia da UFRGS.



Fonte: Autor.

Figura 4.30: Mapa com indicadores de qualidade do ar. Ao clicar no ponto, abre-se uma janela com detalhes do que o device\_sensor possui.



Fonte: Autor.

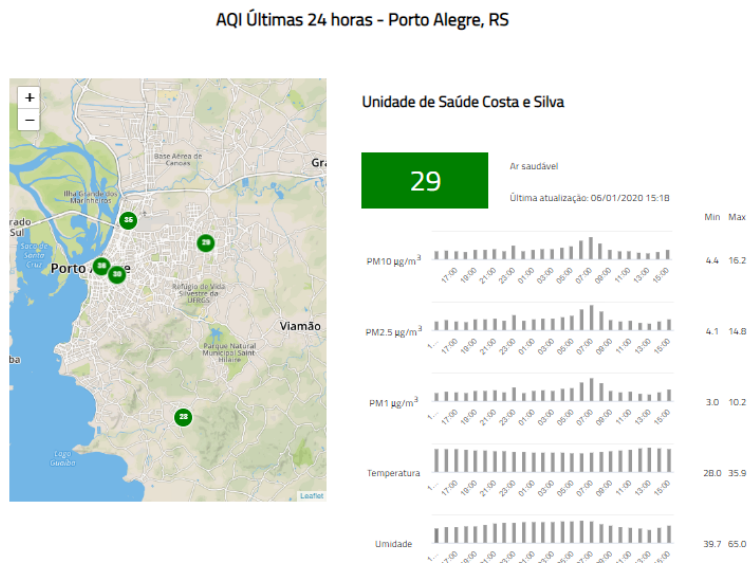
ção por parte dos usuários finais. A Figura 4.32 mostra a mesma tela do mapa em um smartphone com as opções que o Menu oferece ao ser solicitado.

Após os testes de visualização com os painéis anteriores, foram escolhidas as seguintes formas de visualização para o projeto. A Figura 4.33 mostra um gráfico com múltiplos sensores com os valores de dióxido de carbono. Já a Figura 4.34 Mostra uma visão geral dos gráficos das variáveis pós pandemia, com indicações de alertas para, stress térmico, CO<sub>2</sub> e qualidade do ar (não utilizado), além de gráficos para umidade, temperatura, dióxido de carbono e stress térmico.

O estresse térmico ou índice de calor busca determinar o efeito da umidade relativa sobre a temperatura aparente do ar, e com isto criou-se um índice para definir qual a intensidade do calor que uma pessoa sente, variando em função da temperatura e da umidade do ar. Temos o suor como mecanismo de troca de calor, reduzindo a temperatura



Figura 4.31: Mapa pequeno com destaque para o índice de qualidade do ar e histórico de média horária para as variáveis de sensor\_code que o local possui.



Fonte: Autor.

do corpo. A água em forma de vapor contida no ar reduz a taxa de evaporação do suor da pele, e assim faz com que uma pessoa sinta mais calor em um ambiente com umidade relativa elevada do que outra pessoa em um ambiente seco de mesma temperatura.

## 4.6 PREPARAÇÃO PARA TESTES

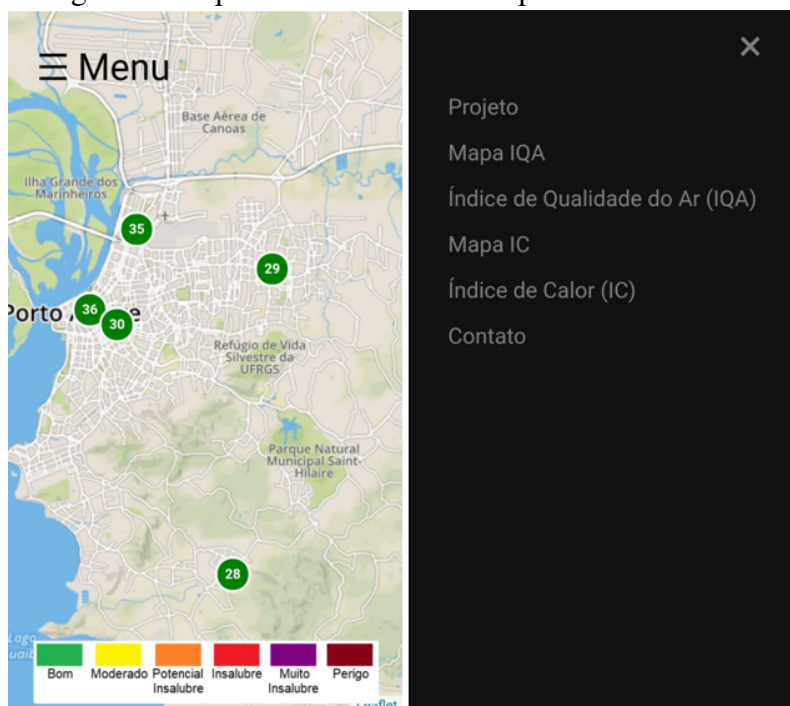
### 4.6.1 Infraestrutura local

Os locais buscados para os testes de campo foram escolas que pudessem dar apoio em relação a integridade dos equipamentos, fornecimento de energia para os equipamentos bem como rede de internet sem fio.

Trabalhos anteriores mostraram certa dificuldade na condução de monitoramento de longo prazo, como a troca de senhas de redes Wi-Fi da instituição, troca de funcionários, fazendo com que um certo período de monitoramento fosse perdido, devido a necessidade de novas explicações sobre o projeto com a equipe técnica e sobre o uso de manutenção dos equipamentos.

Assim, buscou-se para este trabalho a implementação dos sensores em uma escola que pudesse, nos anos de 2019 e 2020, ser parceira do projeto, a fim de disponibilizar alguns ambientes educacionais para a instalação dos sensores e pessoal que interagisse quando houvesse a necessidade de alguma atuação junto aos sensores. A Figura 4.35

Figura 4.32: Imagem da direita com o mapa apresentado para os sensores de qualidade do ar de Porto Alegre e na esquerda o menu ofertado para os usuários.



Fonte: Autor.

mostra uma imagem aérea, com o destaque para os prédios em que foram instalados os sensores.

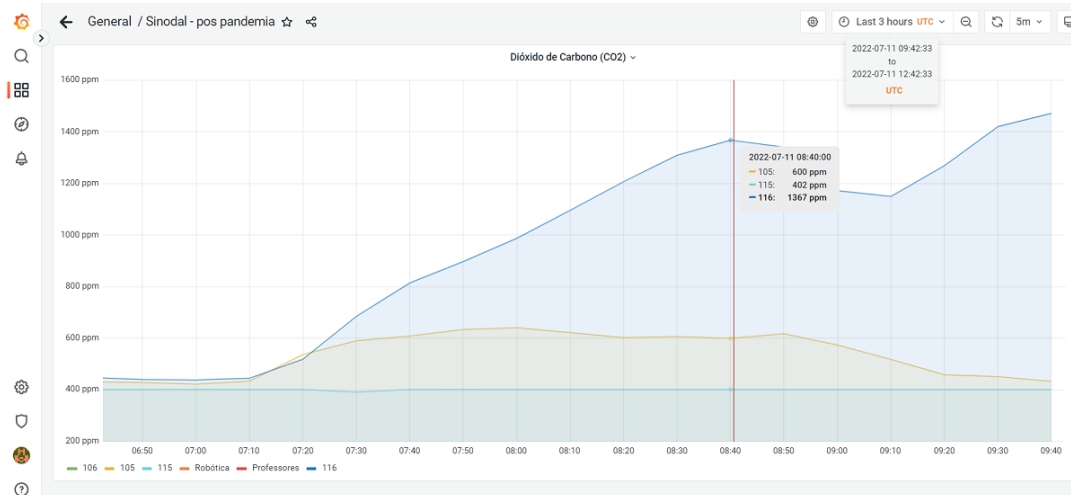
A partir da escolha da escola foram então escolhidos os pontos a serem utilizados para a instalação dos sensores. Foi objetivado distribuir entre todos os níveis de educação da escola, que possui a pré-escola, desde berçário (não instalado), passando para a Educação Infantil, Ensinos Fundamental (Anos Iniciais e Finais), até o Ensino Médio. Além disso, a área administrativa também foi selecionada para a instalação.

Uma característica que pode ser relevante é a da topografia, sendo que há uma elevação em relação ao nível do mar de aproximadamente 51 m para prédio 3 (sala 115) e de aproximadamente 37 m para os demais prédios, como mostra a Figura 4.36. Esta questão será abordada em Resultados.

#### 4.6.1.1 Educação Infantil

Sala da Educação Infantil (115), com área de 41,4 m<sup>2</sup> e pé direito de 3,2 m. Foram instalados sensor de temperatura, umidade relativa do ar e dióxido de carbono. A ocupação da sala foi de 18 pessoas antes da pandemia e de 17 pessoas após a pandemia. Com este número de pessoas, a razão de pessoas por m<sup>3</sup> ficou em 0,14 e 0,13 respectivamente,

Figura 4.33: Gráfico com múltiplos sensores com os valores de dióxido de carbono.



Fonte: Autor.

em cada período citado.

#### 4.6.1.2 Ensino Fundamental, Anos Iniciais

Sala do Ensino Fundamental Anos Iniciais (105), com área de 60,8 M<sup>2</sup> e pé direito de 3,4 m. Foram instalados sensor de temperatura, umidade relativa do ar e dióxido de carbono. A ocupação da sala foi de 27 pessoas antes da pandemia e de 21 pessoas após a pandemia. Com este número de pessoas, a razão de pessoas ficou em 0,13 e 0,10 respectivamente, em cada período citado.

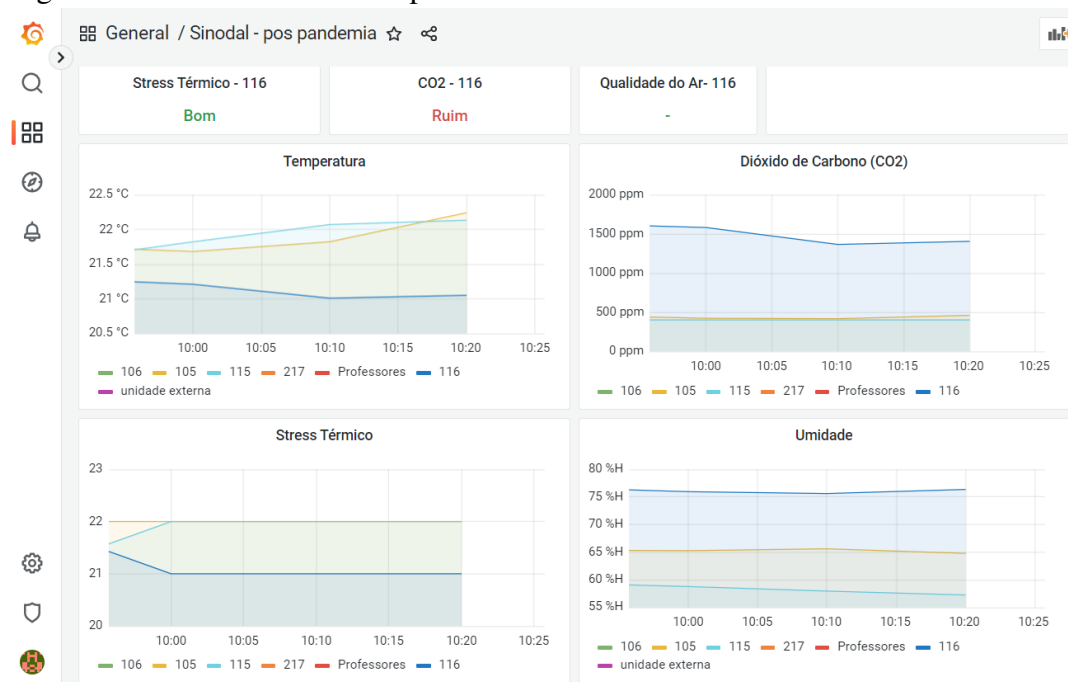
#### 4.6.1.3 Ensino Fundamental, Anos Finais

Sala do Ensino Fundamental Anos Finais (116), com área de 65,5 m<sup>2</sup> e pé direito de 3,55 m. Foram instalados sensor de temperatura, umidade relativa do ar e dióxido de carbono. A ocupação da sala foi de 39 pessoas antes e depois da pandemia. Com este número de pessoas, a razão de pessoas ficou em 0,17 em ambos períodos.

#### 4.6.1.4 Ensino Médio

Sala do Ensino Médio (106), utilizadas para as aulas de Biologia, com área de 29,2 m<sup>2</sup> e pé direito de 3,55 m. Foram instalados sensor de temperatura, umidade relativa do ar e dióxido de carbono antes e depois da pandemia, sendo que antes da pandemia a caixa também continha sensores de VOC e material particulado. A ocupação da sala foi de 35 pessoas antes e depois da pandemia. Com este número de pessoas, a razão de

Figura 4.34: Gráfico com múltiplos sensores com os valores de dióxido de carbono.



Fonte: Autor.

peças ficou em 0,34 em ambos períodos.

#### 4.6.1.5 Administrativo, apoio

O Laboratório de Informática (205) era uma área de uso comum de diversas turmas. A sala foi reformulada e deixou de existir como tal, dando lugar ao Laboratório de Robótica, sendo que possuía área de 66,6 m<sup>2</sup> e pé direito de 3,55 m. Foram instalados sensor de temperatura, umidade relativa do ar, dióxido de carbono, VOC e material particulado. A ocupação da sala variou entre 16 e 34 pessoas. Com este número de pessoas, a razão de pessoas ficou entre 0,07 e 0,14 respectivamente.

O Laboratório de Robótica (217) é uma área de uso comum de diversas turmas, sendo que o uso principal se dá pelo Ensino Fundamental Anos Finais. A sala possui área de 132,1 m<sup>2</sup> e pé direito de 3,4 m. Foram instalados sensor de temperatura, umidade relativa do ar e dióxido de carbono. A ocupação da sala variou entre 16 e 34 pessoas. Com este número de pessoas, a razão de pessoas ficou entre 0,04 e 0,08 respectivamente.

A Sala dos Professores é uma área de uso comum dos professores, localizada no prédio principal. Sendo que a maior ocupação se dá no turno da manhã. Foram instalados sensor de temperatura, umidade relativa do ar e dióxido de carbono antes e depois da pandemia, sendo que antes da pandemia a caixa também continha sensores de VOC e material particulado. A sala possui área de 89,4 m<sup>2</sup> e pé direito de 3,35 m. A ocupação

Figura 4.35: Imagem aérea da escola utilizada para os testes, no município de São Leopoldo, RS. Prédio Principal com Ensino Médio e Ensino Fundamental Anos Finais (1), Ensino Fundamental Anos Iniciais (2), Educação Infantil (3) e Prédio da Biblioteca e salas de apoio (4).



Fonte: Google.

da sala variou entre 11 e 34 pessoas antes da pandemia. Com este número de pessoas, a razão de pessoas ficou entre 0,04 e 0,10 respectivamente. A ocupação da sala variou entre 8 e 25 pessoas depois da pandemia. Com este número de pessoas, a razão de pessoas ficou entre 0,03 e 0,08 respectivamente.

#### 4.7 PIVOTAMENTO APÓS COVID-19

Em 2017, foram instalados os primeiros sensores nos prédios das faculdades de Engenharia e Educação, dentro do programa de pós-graduação em Informática na Educação.

Em 2018, eles foram testados na Escola Sinodal em São Leopoldo, RS, Brasil, com melhorias no case, placa eletrônica e substituição de sensores. Sensores de CO<sub>2</sub> foram empregados em todas as salas de aula, e algumas também tinham sensores de material particulado e compostos orgânicos voláteis (VOC).

A coleta de dados havia iniciado em 2018 de forma experimental, com avanço na placa de aquisição, escolha dos sensores e análise prévia dos dados já coletados. Com a

Figura 4.36: Imagem do Google Earth, com visão em perspectiva da escola, mostrando a diferença de altitude entre os prédios, sendo que o prédio 3 está em um ponto elevado em relação aos demais.



Fonte: Google Earth.

Figura 4.37: Sala de aula da Educação Infantil (sala 115) em que foi instalada caixa com sensores.



Fonte: Gerson Engster.

programação original era previsto que o ano de 2020 fosse o de coleta de dados integral, perpassando todos os períodos de um ano letivo. Porém, com o evento da COVID-19 não foi possível seguir com o planejamento original.

Com a postergação do presente projeto, também houve um pivotamento no planejamento, surgindo então a oportunidade de fazer uma comparação entre os períodos pré pandemia e pós pandemia. A maior dificuldade da comparação se deu em virtude da própria forma de enfrentamento de um evento singular na história contemporânea.

Até o final de 2019, estavam instalados no Sinodal em lotação definitiva, em seis ambientes. Na tabela 4.4 pode-se observar a distribuição de sensores pelos ambientes com a configuração de cada um em relação aos sensores antes da pandemia.

No início de 2021, os sensores foram recuperados para manutenção e substituição de peças, e posteriormente reinstalados. Um ponto de sensoriamento foi movido para um novo prédio. Os novos sensores eram do mesmo modelo para CO<sub>2</sub>, e os sensores de material particulado e VOC não foram mais incluídos. Na tabela 4.5 pode-se observar a distribuição de sensores pelos ambientes com a configuração de cada um em relação aos

Figura 4.38: Sala de aula (105) do Ensino Fundamental, Anos Iniciais em que foi instalada caixa com sensores.



Fonte: Gerson Engster.

Tabela 4.4: Tabela de distribuição de sensores pelas salas, níveis educacionais e prédios pré pandemia.

Sala	Nível Educacional	Prédio	Temp	Hum	CO <sub>2</sub>	VOC	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
115	Educação Infantil	3	x	x	x	x	x	x
105	Ensino Fundamental	3	x	x	x			
116	Ensino Fundamental	3	x	x	x	x	x	x
106	Ensino Médio	3	x	x	x			
205	Educação Infantil	3	x	x	x	x	x	x
Prof.	Administrativo	3	x	x	x	x	x	x

Fonte: Autor

sensores após a pandemia.

O retorno às aulas presenciais durante o ano de 2021 foi gradativo e em diferentes momentos para diferentes séries. O jardim de infância foi o primeiro a retornar em tempo integral, seguido pelos anos iniciais do ensino fundamental. Seguiu-se o terceiro (último) ano do ensino médio e, em seguida, as demais séries, conforme demonstrado na Tabela 4.6.

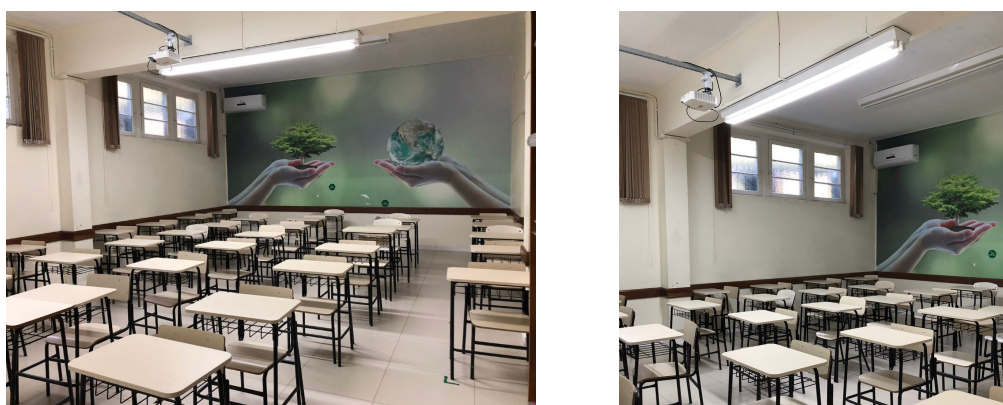
As características físicas das salas de aula e ambientes de apoio foram consideradas, a fim de que o volume de ar disponível em relação ao números de estudantes que ocupavam o ambientes pudessem ser parametrizados através de uma razão entre o número deles e o volume de ar teórico disponível para cada um, como pode ser observado nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Figura 4.39: Sala de aula (116) do Ensino Fundamental, Anos Finais em que foi instalada caixa com sensores.



Fonte: Gerson Engster.

Figura 4.40: Sala de aula (106) do Ensino Médio em que foi instalada caixa com sensores.



Fonte: Gerson Engster

A ocupação das salas e ambientes de apoio tiveram uma ocupação diferente em diversos momentos do dia, tanto antes quanto depois da pandemia. Salas não são ocupadas da mesma forma nos turnos da manhã e tarde, por exemplo, no Ensino Médio, onde a parte da tarde cada turma possui turnos específicos de aula, não preenchendo todos os horários.

Além desta característica, após o retorno das aulas, a ocupação teve um retorno gradual de estudantes, com ocupação parcial das salas de aula, como pode ser observado nas Tabelas 4.9 e 4.10.

Em 2021, conforme regramento de cada Estado brasileiro, o retorno as salas de aula foi gradual, com início pela Educação Infantil e Ensino Médio Anos Iniciais. Muito pelo baixo risco associado a esta faixa etária em relação a COVID-19 e a necessidade de pais necessitarem da escola para deixar seus filhos e pudessem trabalhar. Também



Figura 4.41: Sala da Robótica, destinada principalmente ao Ensino Fundamental, com frequência menor do Ensino Médio. .



Fonte: Gerson Engster

Tabela 4.5: Tabela de distribuição de sensores pelas salas, níveis educacionais e prédios pós pandemia.

Sala	Nível Educacional	Prédio	Temp	Hum	CO <sub>2</sub>	VOC	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
115	Educação Infantil	3	x	x	x			
105	Ensino Fundamental	3	x	x	x			
116	Ensino Fundamental	3	x	x	x			
106	Ensino Médio	3	x	x	x			
217	Ensino Fundamental	3	x	x	x			
Prof.	Administrativo	3	x	x	x			

Fonte: Autor

o último ano do Ensino Médio foi privilegiado no retorno, pela óbvia necessidade de finalizar a Educação Básica.

Como pode-se ver na Tabela 4.10 o retorno foi gradual em a cada ambiente, sendo que estas informações também tiveram que ser consideradas na tabulação dos dados.

Figura 4.42: Sala dos professores, com ocupação bastante irregular durante o período de testes.



Fonte: Gerson Engster.

Tabela 4.6: Tabela de retorno as aulas por salas e níveis educacionais. \*retorno parcial

Sala	Nível Educacional	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
115	Educação Infantil	x	x	x	x	x	x	x	x	x
105	Ensino Fundamental	x	x	x	x	x	x	x	x	x
116	Ensino Fundamental				x*	x*	x	x	x	x
106	Ensino Médio		x	x	x	x	x	x	x	x
217	Ensino Fundamental				x	x	x	x	x	x
Prof.	Administrativo	x*	x*	x*	x*	x	x	x	x	x

Fonte: Autor

Tabela 4.7: Tabela de ocupação por estudantes. antes da pandemia, de cada ambiente com sensores, com ocupação distinta em períodos e horários distintos.

Sala	Nível Educacional	Prédio	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Ocupação (estudantes)	Ocupação/ m <sup>3</sup> de ar
115	Educação Infantil	3	41,4	3,2	18	0,14
105	Ensino Fundamental	3	60,8	3,4	27	0,13
116	Ensino Fundamental	3	65,5	3,55	39	0,17
106	Ensino Médio	3	29,2	3,55	35	0,34
205	Ensino Fundamental	2	66,6	3,35	34	0,14
					28	0,12
					16	0,07
Prof.	Administrativo	3	89,4	3,55	15	0,05
					11	0,04
					39	0,17

Fonte: Autor

Tabela 4.8: Tabela de ocupação por estudantes. após a pandemia, de cada ambiente com sensores, com ocupação distinta em períodos e horários distintos.

Sala	Nível Educacional	Prédio	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Ocupação (estudantes)	Ocupação/ m <sup>3</sup> de ar
115	Educação Infantil	3	41,4	3,2	17	0,14
105	Ensino Fundamental	3	60,8	3,4	21	0,10
116	Ensino Fundamental	3	65,5	3,55	39	0,17
106	Ensino Médio	3	29,2	3,55	35	0,34
217	Ensino Fundamental	2	132,1	3,35	30	0,07
					16	0,04
					34	0,08
					28	0,06
Prof.	Administrativo	3	89,4	3,55	16	0,05
					8	0,03
					25	0,08
					10	0,03

Fonte: Autor

Tabela 4.9: Tabela de ocupação em relação aos turnos da semana, pré pandemia.

Sala	Nível Educacional	Ocup/m <sup>3</sup> de ar	Seg M	Seg T	Ter M	Ter T	Qua M	Qua T	Qui M	Qui T	Sex M	Sex T
115	Educ. Inf.	0.14	x		x		x		x		x	
105	Ens. Fund.	0.13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
116	Ens. Fund.	0.17	x		x	x	x		x	x	x	
106	Ens. Médio	0.34	x		x	x	x		x	x	x	
205	Ens. Fund.	0.14	x		x	x	x		x	x	x	
		0.12 0.07		x				x				
Prof.	Admin.	0.10	x		x		x		x		x	
		0.05				x				x		
		0.04		x				x				x

Fonte: Autor

Tabela 4.10: Tabela de ocupação em relação aos turnos da semana, pós pandemia.

Sala	Nível Edu- cacional	Ocup/m3 de ar	Seg M	Seg T	Ter M	Ter T	Qua M	Qua T	Qui M	Qui T	Sex M	Sex T
115	Educ. Inf.	0.13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
105	Ens. Fund.	0.10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
116	Ens. Fund.1	0.17	x		x		x		x		x	
	2	0.17	x		x		x		x	x	x	
106	Ens. Médio	0.34	x		x	x	x		x	x	x	
217	Ens. Fund.	0.07	x		x		x		x		x	
		0.04		x								
		0.08				x				x		
		0.06							x			
Prof.	Admin.1	0.05	x		x		x		x		x	
	2	0.03		x		x		x		x		x
	3	0.08	x		x		x		x		x	
	4	0.03	x		x		x		x		x	

Salas 115 e 105: a partir de abril. Sala 116 1: 1/ago até 17/out, Sala 116 2: a partir de 18/out. Sala 106: a partir de maio. Sala 217: a partir de agosto. Sala dos Professores 1 e 2: 3/mai até 15/ago. Sala dos Professores 3 e 4: a partir de 16 ago.

Fonte: Autor.

## 5 RESULTADOS

A fim de relatar os resultados obtidos, vale aqui ressaltar o que já foi descrito no Capítulo 1 como sendo o objetivo principal: "criar um Sistema de Monitoramento de Qualidade Ar em Ambientes Educacionais Visando a Redução do Impacto de Poluentes na Saúde e Cognição" e objetivos específicos, de forma sintetizada:

- Analisar os fatores ambientais que podem afetar a saúde e cognição;
- Analisar as opções de hardware de baixo custo para atender o item anterior;
- Projetar e construir o equipamento;
- Desenvolver sistemas de captura, análise e visualização dados do item anterior;
- Implementar e testar metodologia de inserção dos equipamentos em ambientes educacionais da Região Metropolitana de Porto Alegre;
- Comparar os dados coletados pré e pós pandemia COVID-19.

Frente a estes objetivos, também no mesmo capítulo, foram expostas as hipóteses deste estudo:

- É possível implementar um sistema de monitoramento ambiental de baixo custo, com confiabilidade aceitável, para o sistema público/privado educacional brasileiro;
- É possível desenvolver sistema de monitoramento da qualidade do ar com foco específico em ambientes educacionais;

Assim, serão abordados cada um dos objetivos específicos e em cada um uma análise em relação as hipóteses lançadas.

### 5.1 ANALISAR OS FATORES AMBIENTAIS QUE PODEM AFETAR A SAÚDE E COGNIÇÃO

Como resultado deste objetivo secundário foram obtidas informações conceituais, normas e estudos sobre como os fatores ambientais podem afetar os estudantes de maneira que sua saúde e cognição sejam afetados de forma negativa. Conforme as Tabelas D.1 e D.2 da ANVISA, tanto agentes biológicos quanto químicos são consideradas possíveis fontes de poluentes biológicos.

- Agentes biológicos

- Bactérias;
- Fungos;
- Protozoários;
- Vírus;
- Algas;
- Pólen;
- Artrópodes;
- Animais.
  
- Agentes químicos
  - Monóxido de carbono;
  - Dióxido de carbono;
  - Dióxido de nitrogênio;
  - Ozônio;
  - Formaldeídos;
  - Material particulado;
  - Fumo e tabaco;
  - Compostos orgânicos voláteis;
  - Compostos orgânicos semi-voláteis.

Além de agentes biológicos e químicos, a ANVISA também recomenda Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, conforme Apêndice C, que ressaltam a importância dos parâmetros físicos:

- Temperatura;
- Umidade relativa do ar;
- Velocidade e taxa de renovação do ar;
- Grau de pureza do ar.

Com base no referencial teórico e trabalhos correlatos (conforme relatado nos itens 1 e 2), a temperatura e umidade são variáveis quase ubíquas nos trabalhos. Muito se deve pela própria característica do sensoriamento das demais variáveis, que por vezes requer calibração de seus valores com base nestas características ambientais. Além disto, o conforto térmico nos é condição natural, que afeta nosso modo de vestir e a forma como construímos nossas edificações.

Além destes conhecidos fatores, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) atenta para os riscos de câncer de pulmão por radônio<sup>1</sup>. O documento "Ficha de Informação Toxicológica - Radônio"<sup>2</sup> da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), alerta para o radônio como sendo uma das principais causas de câncer de pulmão em vários países do mundo.

Em relação as hipóteses para este item, considera-se que as variáveis a serem monitoradas devem seguir as orientações de órgão de saúde, governo e tendências mundiais quanto a qualidade de vida. O documento Diretrizes da OMS para a qualidade do ar interior: poluentes selecionados (*WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*(ORGANIZATION et al., 2010)) mostra um estudo das substâncias consideradas naquela revisão (benzeno, monóxido de carbono, formaldeído, naftaleno, dióxido de nitrogênio, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (especialmente benzo(a)pireno), radônio, tricloroetileno e tetracloroetileno) foram adicionados às diretrizes da OMS considerando informações sobre a existência de fontes, sobre a disponibilidade de dados toxicológicos e epidemiológicos e sobre os níveis de exposição que causam problemas de saúde.

Não há como fechar uma lista permanente de poluentes, uma vez que o próprio desenvolvimento tecnológico acaba criando novos poluentes, em tintas, vernizes, materiais da indústria química que acabam sendo lançados no interior dos ambientes simplesmente por colocarmos os bens de consumo nos quais eles estão impregnados dentro de nossas casas, escritórios, escolas ou hospitais.

Frente a estas questões, optou-se por trabalhar com os poluentes que a legislação brasileira nos alerta através da ANVISA e, a partir destes, os demais objetivos foram sendo trabalhados.

## 5.2 ANALISAR AS OPÇÕES DE HARDWARE DE BAIXO CUSTO EXISTENTES

As atividades do período pré pandemia focaram em alguns sensores de variáveis ambientais e agentes poluentes para ambientes internos, sendo os escolhidos:

- Temperatura
- Umidade relativa do ar
- Monóxido de carbono

---

<sup>1</sup><https://www.epa.gov/radon>

<sup>2</sup>[url:https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2019/01/Rad%C3%B4nio.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2019/01/Rad%C3%B4nio.pdf)

- Dióxido de carbono
- Ozônio
- Material particulado
- Compostos orgânicos voláteis

Após os primeiros meses de testes alguns sensores foram descartados, como o sensor de ozônio, que raramente capturava a presença do gás, provavelmente pela falta de fatores que gerem este gás estar ausente nos ambientes ou próximos deles, formado por reações entre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, na presença de luz solar, sendo estes últimos liberados na queima incompleta e evaporação de combustíveis e solventes<sup>1</sup>.

Os sensores de compostos orgânicos voláteis também não tiveram detecções relevantes (98% dos dados sem detecção) em dois dos quatro equipamento dos testes iniciais. Estes poluentes são resultantes da queima incompleta e evaporação de combustíveis e de outros produtos orgânicos, sendo emitidos por veículos, pelas indústrias, pelos processos de estocagem e transferência de combustível, por produtos de limpeza, etc. Da mesma forma o monóxido de carbono, que é resultante da queima incompleta de combustíveis de origem orgânica, muito comum onde há tráfego intenso de veículos<sup>2</sup>, não foi encontrado dentro do ambiente escolar. Nos dois sensores que tiveram seu funcionamento da forma esperada, os valores foram interessantes e apontam para a necessidade de manter este poluente dentro do rol desejado. Ainda assim, não tendo sido identificada a razão pela qual os mesmo não tiveram seu funcionamento de forma adequada, optou-se por excluí-los até uma maior maturidade sobre este tipo de sensor de baixo custo. Outro fator que sempre esteve presente para a escolha foi o custo de cada sensor e do sistema como um todo. Inicialmente a maior dificuldade foi estabelecer o conceito de baixo custo.

O material particulado teve concentrações que variaram conforme características climáticas, mais comum em dias muito secos. Também foram encontrados valores hiperestimados quando as concentrações de umidade relativa do ar passavam de 70 80%, os resultados poderiam ser questionáveis, conforme já relatado nos Capítulos 1, 2 e 4, ainda assim em curtos períodos de tempo. Após a pandemia do COVID-19, eles não foram considerados para as análises finais deste estudo, com foco no CO<sub>2</sub>. Outro fator que influenciou esta tomada de decisão, mesmo ele sendo um dos principais causadores de doenças de vias aéreas superiores, foi a falta de sensores em todos os ambientes no período

---

<sup>1</sup><https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>

<sup>2</sup><https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>



pré pandemia.

Assim, perante o objetivo secundário de analisar os fatores ambientais de que podem afetar a saúde e cognição, chegou-se a um equipamento mínimo, com as seguintes variáveis a serem monitoradas:

- Temperatura, sensores SHT20 ou SHT30
- Umidade relativa do ar, sensores SHT20 ou SHT30
- Dióxido de carbono, MH-Z14 ou MH-Z19
- Material particulado, sensores PMS5003 ou PMS7003
- Compostos orgânicos voláteis, sensor SGP30

### **5.3 PROJETAR E CONSTRUIR O EQUIPAMENTO**

Os equipamentos projetados para serem implementados foram descritos Capítulo 4 sendo que as características a serem observadas para a confecção do projeto de cada escola devem conter considerações em relação a:

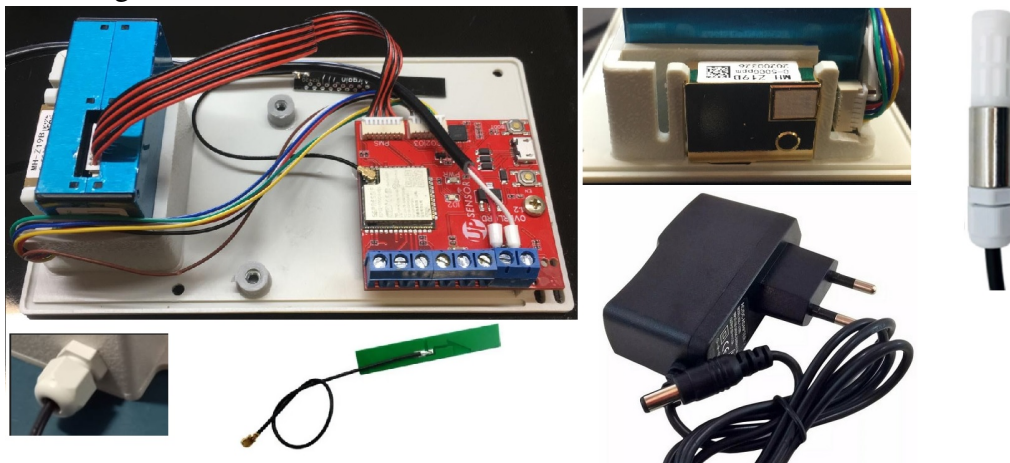
- Placa de processamento e aquisição de dados
- Sensores
- Caixa de acondicionamento e fixação
- Hardware de comunicação
- Sistema de energização
- Firmware a ser embarcado

As características do elementos acima devem estar em sintonia com a forma como se deseja construir o seu equipamento, com a utilização de serviços de terceiros, de forma autônoma, ou um misto destas duas.

Os sensores testados que foram selecionados como adequados para a propostas seriam o de material particulado, com o modelo PMS5003/PMS7003 da Plantower como o ideal, pelo conector ser mais comum, o sensor MH-Z19 (ou o MH-Z14) para o monitoramento de dióxido de carbono e o sensor de temperatura e umidade SHT-020/030 para facilitar a confecção da placa de circuito impresso. O conjunto pode ser visto na Figura 5.1.

Para esta opção o custo estimado do kit em 2022 seria em torno de USD 140, como pode ser observado o detalhamento na Tabela 5.1. Se os componentes forem adquiridos

Figura 5.1: Equipamento proposto com a montagem mais adequada para escolas. No canto superior esquerdo uma visão geral, no direito o destaque para o sensor MH-Z19 (dourado) e o sensor de temperatura e umidade externo (branco). Abaixo, canto inferior esquerdo a forma de fixar os cabos, ao lado uma antena externa para Wi-Fi e na direita a fonte de energia.



Fonte: Autor.

em volumes pequenos, de até USD 50.00<sup>1</sup>, os mesmo não serão taxados, apenas podem ser cobrada a taxa posta de R\$15,00<sup>2</sup>. Por este motivo é considerado apenas o valor base de cada elementos, sem considerar uma possível taxação de importação, que pode variar conforme cada processo de compra

Outra opção seria integrar o sensor de temperatura e umidade, integrando na placa de circuito impresso, como visto na Figura 5.2. Fazendo com que haja uma necessidade maior de cuidado no projeto com a haste.

Figura 5.2: Placa de circuito impresso em sua última versão modificada, com o sensor de umidade e temperatura integrado e preso a um apêndice distante do restante da placa, com muita área de troca de calor, sendo um opção para maiores . Reprodução da Figura A.10



Para esta variação o custo estimado do kit em 2022 seria em torno de USD 130,

<sup>1</sup><https://www.remeaonline.com.br/blog/importacao-pessoa-fisica/>

<sup>2</sup><https://www.correios.com.br/receber/encomenda/perguntas-frequentes-internacional>

Tabela 5.1: Custo médio dos componentes para a confecção própria do kit, com o sensor de temperatura e umidade conectado via cabo. Placa de circuito impresso e caixa de acondicionamento confeccionadas por terceiros. Todos os valores não consideram impostos.

Descrição do componente	Valor USD	Valor R\$*
Placa de circuito impresso com os seguintes elementos integrados: ESP32u, bornes pinos com parafusos, conector microusb, conector para sensor de material particulado e dióxido de carbono	58.00	319,00
Sensor de material particulado PMS5003	26.00	143,00
Sensor de dióxido de carbono MH-Z19	22.00	121,00
Sensor de compostos orgânicos voláteis totais SGP30	8.00	44,00
Sensor de temperatura e umidade encapsulado SHT20	15.00	82,00
Antena para WI-Fi 2.4GHz 5 dbi com conector IPEX	1.20	6,60
Fonte de alimentação 5V, 2A	3.64	20,00
Prensa cabos	1.45	8,00
Caixa de acondicionamento (confeccionada em lote)	14.54	80,00
<b>Total</b>	<b>149.83</b>	<b>833,60</b>

Fonte: Autor, \*câmbio 1 USD = R\$ 5,50).

como pode ser observado o detalhamento na Tabela 5.2.

Ambas opções são consideradas utilizando fornecedores para a confecção da placa de circuito impresso e para a confecção da caixa de acondicionamento. Outra opção seria a confecção de própria da placa de circuito impresso através das técnicas já citadas com o encaixe de uma NodeMCU com ESP32u, como mostrado na seção A.1. Além disso a caixa de acondicionamento poderia ser confeccionada utilizando impressão 3D, conforme mostra a Figura 5.3. Com isso teria-se outra composição de custos, conforme mostra a Tabela 5.3.

Figura 5.3: Caixa de acondicionamento feita em impressão 3d para substituir a confecção por terceiros e reduzir custos. Reprodução da Figura B.4



Tabela 5.2: Custo médio dos componentes para a confecção própria do kit, com o sensor de temperatura e umidade integrado na placa de circuito impresso. Placa de circuito impresso e caixa de acondicionamento confeccionadas por terceiros. Todos os valores não consideram impostos.

Descrição do componente	Valor USD	Valor R\$*
Placa de circuito impresso com os seguintes elementos integrados: ESP32u, sensor de temperatura e umidade SHTC3, bornes pinos com parafusos, conector microusb, conector para sensor de material particulado e dióxido de carbono	63.00	343,50
Sensor de material particulado PMS5003	26.00	143,00
Sensor de dióxido de carbono MH-Z19	22.00	121,00
Sensor de compostos orgânicos voláteis totais SGP30	8.00	44,00
Antena para WI-Fi 2.4GHz 5 dbi com conector IPEX	1.20	6,60
Fonte de alimentação 5V, 2A	3.64	20,00
Prensa cabos	1.45	8,00
Caixa de acondicionamento (confeccionada em lote)	14.54	80,00
<b>Total</b>	<b>139.83</b>	<b>766,10</b>

Fonte: Autor, \*câmbio 1 USD = R\$ 5,50).

#### 5.4 DESENVOLVER SISTEMAS CAPTURA, ANÁLISE E VISUALIZAÇÃO DADOS DO ITEM ANTERIOR

O sistema de captura foi desenvolvido para ser utilizado de forma abrangente então, optou-se pela IDE<sup>1</sup> da Arduino, que é um ambiente de desenvolvimento integrado, escrita em Java e programada em C/C++. O software pode ser adquirido gratuitamente no website [www.arduino.cc/en/software](http://www.arduino.cc/en/software) e os drivers para a comunicação entre a placa e o computador podem ser instalados seguindo os passos indicados por um dos três distribuidores oficiais da Arduino no Brasil<sup>2</sup>. É necessário também instalar o pacote de placas, podendo seguir os passos indicados da mesma forma<sup>3</sup>.

A forma mais simples de se apresentar o programa e estruturá-lo em dois blocos:

- `setup()`: Inserida no início, na qual pode ser usada para inicializar configuração;
- `loop()`: Chamada para repetir um bloco de comandos de forma cíclica.

O código começa com a inclusão das bibliotecas necessárias, todos podem ser encontradas pelo nome na própria IDE da Arduino e devem ser instaladas antes. As biblio-

<sup>1</sup>IDE: Integrated Development Environment ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado.

<sup>2</sup>[www.robocore.net/tutoriais/instalando-driver-do-nodemcu](http://www.robocore.net/tutoriais/instalando-driver-do-nodemcu)

<sup>3</sup>[www.robocore.net/tutoriais/iot-devkit-configuracoes-iniciais](http://www.robocore.net/tutoriais/iot-devkit-configuracoes-iniciais)

Tabela 5.3: Custo médio dos componentes para a confecção própria do kit, com o sensor de temperatura e umidade conectado via cabo. Com confecção própria da placa de circuito impresso e da caixa de acondicionamento em impressão 3D. Todos os valores não consideram impostos.

Descrição do componente	Valor USD	Valor R\$*
Placa de fenolite, resistores, capacitores, reguladores de tensão, bornes, material de solda, barra de pinos e fios a serem soldados na placa de fenolite	23.00	126,50
NodeMCU com ESP32u	12.72	70,00
Sensor de material particulado PMS5003	26.00	143,00
Sensor de dióxido de carbono MH-Z19	22.00	121,00
Sensor de compostos orgânicos voláteis totais SGP30	8.00	44,00
Antena para WI-Fi 2.4GHz 5 dbi com conector IPEX	1.20	6,60
Fonte de alimentação 5V, 2A	3.64	20,00
Prensa cabos	1.45	8,00
Caixa de acondicionamento (confeccionada em lote)	4.00	22,00
<b>Total</b>	<b>102.01</b>	<b>561,10</b>

Fonte: Autor, \*câmbio 1 USD = R\$ 5,50).

Código 5.1: Lista de bibliotecas utilizadas.

```
#include <HTTPClient.h>
#include <WiFiManager.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_SHTC3.h>
#include <PMserial.h>
#include <time.h>
```

tecas podem possuir diversas outras funcionalidades que não serão abordadas aqui, além de características que são importantes para este hardware.

Descrição:

- HTTPClient: Biblioteca para fazer solicitações HTTP GET para um servidor web;
- WiFiManager: Biblioteca que serve como um gerenciador de conexões, sendo utilizada para a WiFi. Permite a gravação do nome da rede e senha com a qual deseja se conectar, além de gerenciar a reconexão na mesma em caso de perda da mesma;
- Wire: Biblioteca que permite que a comunicação com dispositivos I<sub>2</sub>C;
- Adafruit\_SHTC3: Biblioteca para o sensor de temperatura e umidade SHTC3;
- PMserial: Biblioteca para o sensor de PMS5003, de material particulado;
- time: Funcionalidade de cronometragem para funções de data e hora, com provisões para sincronizar com fontes de tempo externas como NTP<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>NTP: Network Time Protocol ou Protocolo de Tempo para Redes

Código 5.2: Declarações de constantes e variáveis com reserva de memória.

```

float humd, tmp;
Adafruit_SHTC3 shtc3 = Adafruit_SHTC3();
double pm1, pm2, pm10;
byte addArray[]={0xFF,0x01,0x86,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x79};
char dataValue[9];
float co2Read;
unsigned int resHigh, resLow;
const char server[] = "dash.upsensor.com";
const int port = 80;
const char* ntpServer = "pool.ntp.org";
const long gmtOffset_sec = -10800;
const int daylightOffset_sec = 0;
HTTPClient wificlient;
WiFiClient client2;

```

Logo a seguir, devem ser realizadas as declarações de constantes e variáveis e reservas de memória, se necessário.

Descrição:

- humd: variável para o armazenamento do valor da umidade relativa do ar;
- tmp: variável para o armazenamento da temperatura;
- pm, pm2 e pm10: variáveis para armazenamento de PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> e PM<sub>10</sub> respectivamente ;
- HardwareSerial mhz: declaração de comunicação serial para o sensor de dióxido de carbono na Serial 1;
- SerialPM pms: declaração de comunicação serial para o sensor de dióxido de carbono na Serial 2;
- addArray[]: comando a ser enviado para o sensor de dióxido de carbono como uma requisição de leitura do sensor;
- dataValue[9]: declaração para armazenamento de caracteres a serem recebidos como resposta do sensor de dióxido de carbono;
- co2Read: variável para o armazenamento do valor de dióxido de carbono;
- resHigh e resLow: variáveis para a leitura do valor da variável de dióxido de carbono;
- server[]: servidor para o qual serão enviados os dados coletados;
- port[]: porta a ser utilizada para o envio para o servidor;
- ntpServer: servidor NTP para o qual será requisitada data e hora.
- gmtOffset\_sec: ajusta para o fuso horário local, no caso dos testes era -3h em rela-

## Código 5.3: Descrição do bloco Setup.

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin();
  shtc3.begin();
  pms.init();
  mhz.begin(9600, SERIAL_8N1, 35, 32);
}

```

ção ao GMT<sup>1</sup> 0, então o ajuste foi de  $3 \times 3.600 \text{ s} = -10.800 \text{ s}$ ;

- daylightOffset\_sec: declaração de horário de verão para ajuste, no caso não houve;
- HTTPClient wificlient: declaração para a conexão com o servidor;
- WiFiClient client2: declaração declaração para a conexão com o servidor;

No bloco setup ocorrem as inicializações de comunicação com alguns sensores, wifi e serial para saída de acompanhamento na tela do computador via uSB.

Descrição:

- Serial.begin: inicialização da comunicação serial através da porta serial com o computador, baud rate de 115200 (colocar igual na serial de debug da IDE);
- Wire.begin: iniciação da comunicação I<sub>2</sub>C;
- shtc3.begin: início da comunicação com o sensor SHTC3;
- pms.init: início da comunicação com o sensor PMS5003;
- mhz.begin: início da comunicação com o sensor MH-Z19 (declaração dos parâmetros de baud rate, bits de comunicação, porta RX e porta Tx, respectivamente);

Dentro do bloco loop ocorrem as leituras, quais cálculos necessários, comunicação com os sensores, com o acess point de WiFi que levará os dados para o servidor, bem como enviará para a serial de debug da IDE e posteriormente na tela do computador. A forma como se enviará para o servidor depende do servidor a ser escolhido e a forma como a API de captura for montada. Como exemplo de envio para as planilhas do Google, pode-se seguir exemplos da internet<sup>2</sup>.

Descrição:

- leitura temp e umid: depende da biblioteca a ser escolhida, no caso da Adafruit\_SHTC3.h usa esta forma de captura dos dados;
- leitura de CO<sub>2</sub>: o fabricante determinou a forma de leitura que deve ser seguida;

<sup>1</sup>GMT: Greenwich Mean Time ou Tempo Médio de Greenwich

<sup>2</sup>[www.filipeflop.com/blog/como-enviar-dados-do-esp8266-para-o-google-sheets/](http://www.filipeflop.com/blog/como-enviar-dados-do-esp8266-para-o-google-sheets/)

Código 5.4: Descrição do bloco Loop.

```

void loop() {
// linha de comentario - leitura temp e umid
  sensors_event_t humidity, temp;
  shtc3.getEvent(&humidity, &temp);
  tmp = temp.temperature;
  humd = humidity.relative_humidity;
// linha de comentario - leitura CO2
  mhz.write(addArray, 9);
  mhz.readBytes(dataValue, 9);
  resHigh = (unsigned int) dataValue[2];
  resLow = (unsigned int) dataValue[3];
  co2Read = (256 * resHigh) + resLow;
}
// linha de comentario - leitura PMS
  pms.read();
  if (pms)
  {
    PM01Value = pms.pm01;
    PM2_5Value = pms.pm25;
    PM10Value = pms.pm10;
// linha de comentario - envio para o servidor
    ==rotina de envio para o servidor==
    delay(10000);
  }
}

```

- leitura de material particulado: o fabricante determinou a forma de leitura que deve ser seguida;
- envio de dados para o servidor: dependerá do servidor, sem detalhamento aqui;
- delay: tempo de espera entre cada ciclo de leitura, em milissegundos;

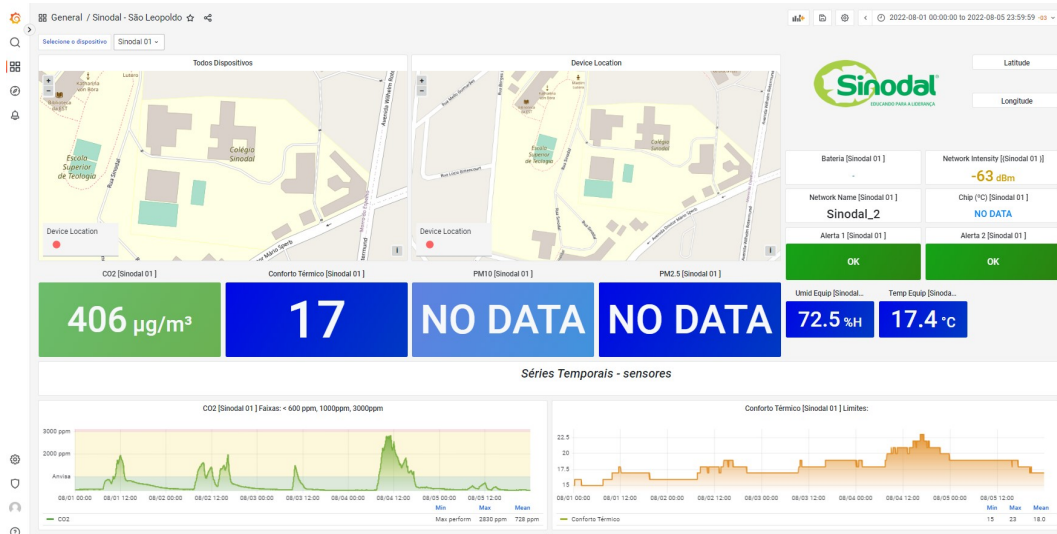
Uma vez que os dados chegaram no servidor escolhido, foi utilizado o Grafana para a Visualização dos dados, aplicação de filtros, regras de alertas visuais e localização. O Grafana é uma aplicação web de análise de código aberto multiplataforma e visualização interativa da web<sup>1</sup>. Ele pode ser adquirido no endereço <https://github.com/grafana/grafana> e instalado no servidor remoto ou local seguindo os tutoriais ali encontrados. Na Figura 5.4 pode-se observar uma visão geral da tela acompanhamento dos dados. Com a opção de dois mapas, um para todos os sensor e outro para o sensor que está sendo analisado no momento. Abaixo dos mapas estão 4 mostradores de dados para as variáveis desejadas. Na base temos os gráficos de séries temporais para as variáveis escolhidas

Na Figura 5.5 é possível visualizar a forma como os usuários podem fazer aferições visuais das variáveis em um certo período, com a visão de mais de uma variável ao mesmo tempo.

<sup>1</sup><https://en.wikipedia.org/wiki/Grafana>



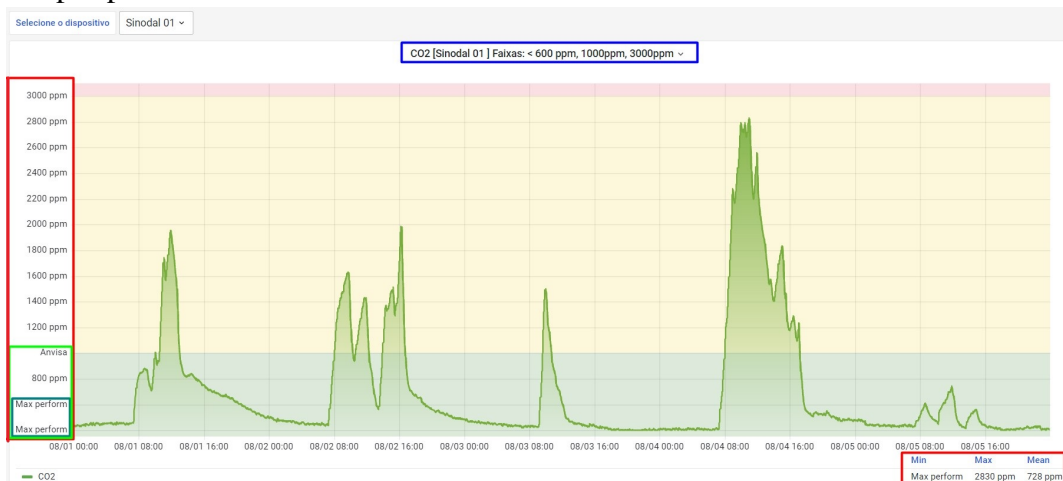
Figura 5.4: Visão geral da tela de visualização de dados com os sensores podendo ser selecionados no menu suspenso do canto superior direito.



Fonte: Autor.

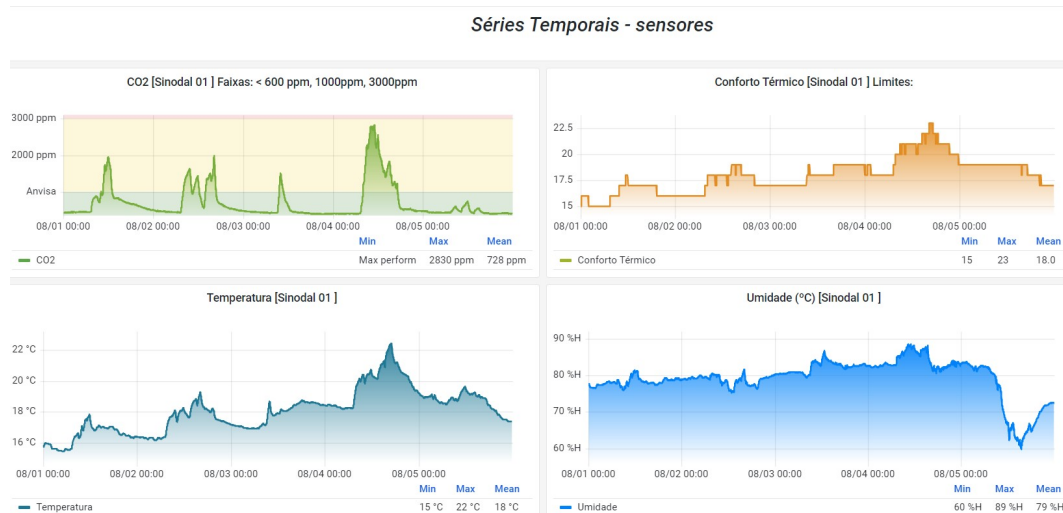
Já na Figura 5.6 foram destacadas regiões onde é possível ler no canto inferior direito os valores mínimo, máximo e médio dentro do período selecionado. Já no topo, estão descritas informações sobre o gráfico, como no caso as faixas de qualidade do ar para CO<sub>2</sub>. No eixo da esquerda estas faixas podem ser vistas inclusive com alusão a legislação, onde a ANVISA preconiza uma média diária de até 1.000 ppm de CO<sub>2</sub>. Para este gráfico foram inseridas áreas coloridas para demarcar as regiões específicas.

Figura 5.6: Detalhamento de um gráfico de gráficos de CO<sub>2</sub>, com área de qualidade do ar coloridas, textos alusivos no eixo vertical da esquerda e valores de mínimo, máximo e médio por período selecionado.



Fonte: Autor.

Figura 5.5: Gráficos de séries temporais com a opção de seleção de qualquer período do banco de dados. Com a visão ao mesmo tempo de mais de uma variável é possível fazer análises visuais também, além de numéricas.



Fonte: Autor.

## 5.5 IMPLEMENTAR E TESTAR METODOLOGIA DE INSERÇÃO DOS EQUIPAMENTOS EM AMBIENTES EDUCACIONAIS DA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE

Os equipamentos após serem configurados necessitavam ser instalados em locais fixos com fornecimento de energia através de uma tomada para a fonte e se sinal de Wi-Fi para que os dados pudessem ser transmitidos. Além das questões relacionadas a estes dois requisitos, as variáveis a serem monitoradas também necessitam de características específicas em relação a coleta, a fim de os dados sejam informações mais próximas possíveis do fenômeno físico.

Como já relatado em 2, a altura de posicionamento dos sensores de CO<sub>2</sub> variam bastante de estudo para estudo, mas preponderantemente ficam entre 1,1 m e 1,5 m de altura em relação ao chão. A ANVISA, como pode ser encontrado D recomenda para os métodos lá detalhados, uma altura de 1,5m em relação ao solo.

O desejo inicial era de posicionar todos os sensores a 1,1 m acima do chão de cada sala. Pequenas variações ocorreram e não foram consideradas aqui. Os motivos variavam desde o encontro de um obstáculo da alvenaria, móveis que estavam nos locais ideais ou mesmo os sensores foram trocados levemente de local nos períodos de férias ou recesso de inverno, durante as constantes reformas e melhorias que ocorrem na escola. As vezes a falta de comunicação com um setor que teoricamente não iria participar do experimento, como o pessoal de manutenção predial, pode ser o motivador de uma alteração de posição

de um sensor sem que haja culpa, como a colocação do sensor muito próximo de outros itens do mobiliário, o que como já foi relatado aqui em 4 pode interferir no fluxo de ar dos sensores, prejudicando as medições.

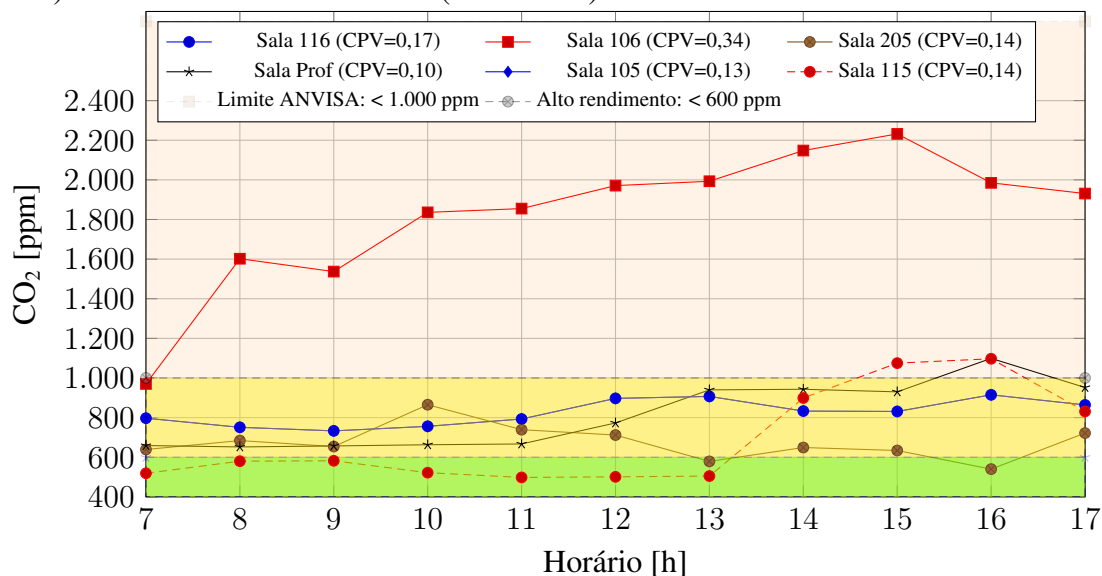
As maiores dificuldades encontradas para a região onde foram instalados os sensores foi a alta umidade relativa do ar, que muitas vezes fica acima de 95% durante diversos dias do inverno do Rio Grande do Sul. Esse tipo de clima afeta a leitura de sensores como o de material particulado, como já relatado em 3, sendo necessária correção através de algoritmo matemático, podendo atingir até 30% de melhoria nos valores, mas somente com um sistema de aquecimento do ar na entrada do sensor poderá resolver esta questão. Esta necessidade é relatada no próprio datasheet de cada fabricante de sensores, sempre com uma faixa de trabalho de umidade relativa do ar em torno de 50% como a ideal. No Capítulo 6 será rediscutida esta questão.

Pensando em uma abordagem nacional para a inserção deste tipo de monitoramento, em outros Estados brasileiros situações contrárias poderão ser encontradas, como a baixíssima umidade do ar que por vezes afeta o Distrito Federal ou a cidade de São Paulo. Outra abordagem deverá ser estudada a fim de que outros sensores não tenham suas leituras afetadas pela faixa de operação de temperatura e umidade relativa do ar para o qual foram projetados e testados seus valores de leitura.

### **5.5.1 Análise de dados coletados pré COVID-19**

Os dados utilizados para o período de análise pré pandemia foram coletados entre os anos de 2018 e 2019. A Figura 5.7 mostra as médias horárias dos valores de concentração de CO<sub>2</sub>. A legenda traz o nome do ambiente com o seu coeficiente CPV, a fim de relacionar o mesmo com os valores encontrados. O CPV é o Coeficiente por Volume, sendo uma indicação do número de pessoas que ocupam um ambiente interno, dado pela razão entre o número de pessoas e o volume de ar do ambiente interno. O volume de ar foi calculado com base nas dimensões de área. São delimitadas 3 áreas, como mostra Tabela 5.4, para os limites indicados de concentração de CO<sub>2</sub>.

Figura 5.7: Concentração de CO<sub>2</sub> por ambiente, média horária pré COVID-19 (2018-2019). Número de amostras 77.501 (2018-2019).



A sala 106, que possui o maior coeficiente CPV, mostra valores elevados durante todo o período. O restante dos ambientes se acomoda na região em que está de acordo com as normas indicadas pela ANVISA. As salas 115 e 105, respectivamente da Educação Infantil e do Ensino Fundamental, Anos Iniciais, se mantiveram na região indicada como de alto desempenho. Ambas as salas eram ocupadas por crianças de menor massa corpórea, com menor volume de troca de ar durante a respiração, em comparação com os demais estudantes.

Os valores de temperatura coletados no período pré COVID-19 são mostrados em médias horárias na Figura 5.8. Não existem limites claros para as melhores faixas de conforto e rendimento para a temperatura, pois dependem de fatores de sazonalidade, legislação, umidade relativa do ar, ventilação do ambiente e da própria vestimenta do estudante. A ANVISA de um modo geral coloca entre 24 °C e 26 °C a faixa adequada. Já a literatura traz em alguns trabalhos, como o de (WOLKOFF; AZUMA; CARRER, 2021) que o alto rendimento é alcançado na faixa de 22 °C e 24 °C.

Tabela 5.4: Limites indicados de concentração de CO<sub>2</sub>.

Acima de 1.000 ppm (limite indicado pela ANVISA).
Entre 600 e 1.000 ppm (entre alto desempenho e limite ANVISA).
Entre 400 e 600 ppm (alto desempenho).

A OMS (ORGANIZATION et al., 2000) traz o valor de 18 °C como o mínimo

aceitável para a ocupação de ambientes internos. Já os valores máximos do mesmo estudo trazem variações em diversos países, com as máximas sendo abaixo de 30 °C, com exceção de países como a Tailândia e República da Coreia, que aceitam respectivamente até 32 °C e 30 °C. A Tabela 5.5, mostra os limites indicados para a temperatura.

Os valores das temperaturas médias ficaram dentro das melhores faixas, com exceção da parte da tarde para a sala 115, com 1 °C apenas acima da faixa recomendada pela ANVISA.

Os dados de umidade relativa do ar coletados no período pré COVID-19 são mostrados em médias horárias na Figura 5.9. Com o controle da temperatura sendo o foco do sistema de condicionamento de ar, a umidade relativa do ar fica deriva. Em ambientes externos, normalmente, há a redução do seu valor com o aumento da temperatura e o inverso também é verdadeiro.

Em um ambiente parcialmente controlado, pois apenas a temperatura interna é forçadamente alterada pelo condicionamento de ar, a umidade relativa também irá ser influenciada pela umidade do próprio ambiente como a infraestrutura civil, o mobiliário e os ocupantes, que também irão afetar esta umidade relativa do ar.

As salas 116, 205 e dos professores apresentaram constantemente valores acima do ideal, com uma leve da sala 105, mas dentro da margem de erro dos equipamentos. Já as salas 106 e 105 ficaram sempre dentro da faixa adequada para o alto rendimento. Os valores considerados adequados pela OMS são entre 40% e 60% de umidade relativa do ar.

Figura 5.8: Temperatura por ambiente, média horária pré COVID-19. Número de amostras 77.501 (2018-2019).

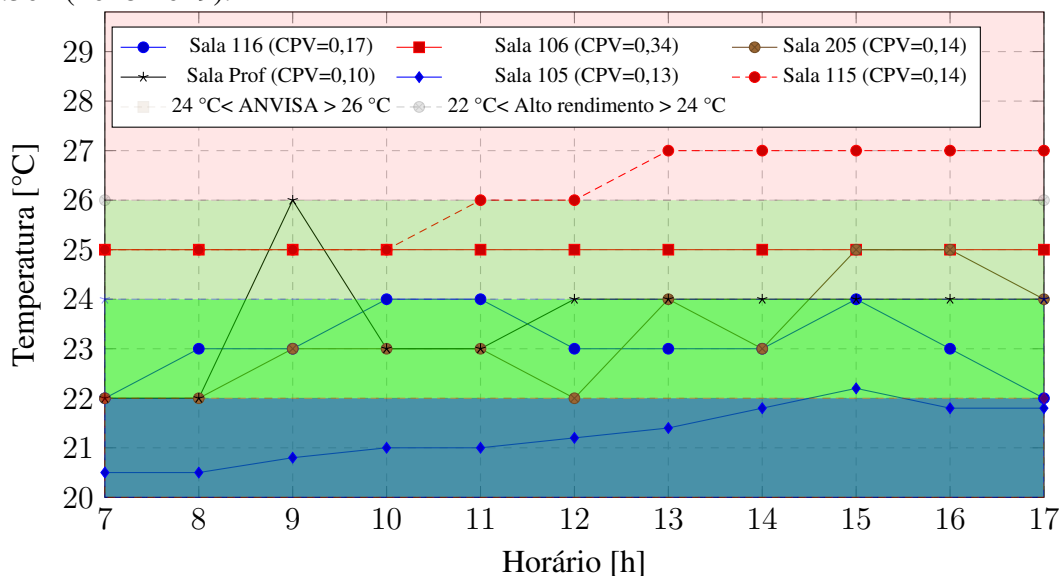


Tabela 5.5: Limites indicados para a temperatura.

Acima do limite indicado pela ANVISA.
24 °C < ANVISA > 26 °C.
22 °C < Alto rendimento > 24 °C.
Abaixo do alto rendimento.

Figura 5.9: Umidade relativa do ar por ambiente, média horária pré COVID-19. Número de amostras 77.501 (2018-2019).

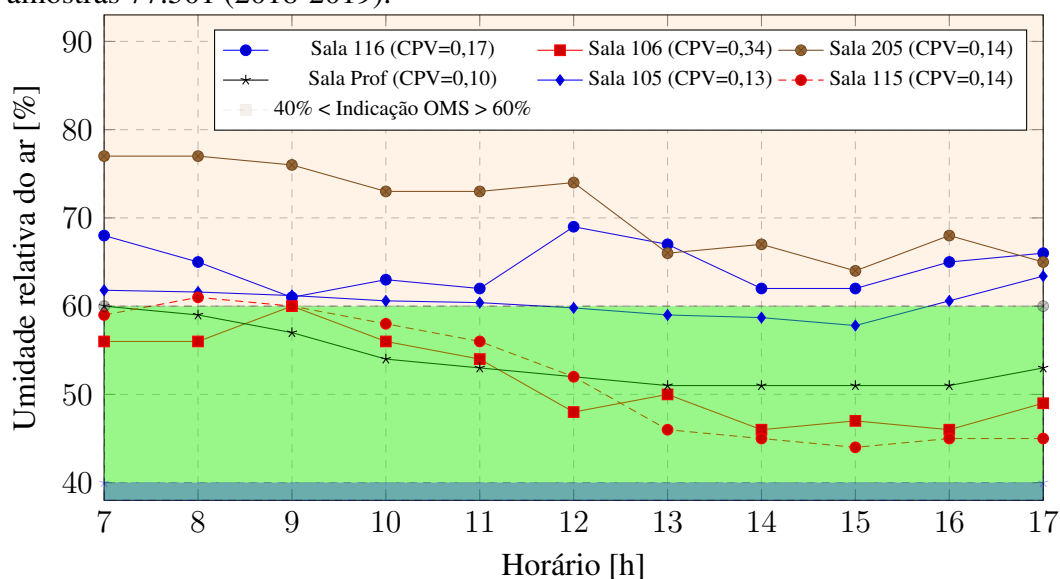


Tabela 5.6: Limites indicados para a umidade relativa do ar.

Acima do limite indicado pela OMS.
40% < Alto rendimento, OMS > 60%.
Abaixo da faixa indicada pela OMS.

Os dados relativos à concentração de material particulado  $PM_{10}$  coletados no período pré COVID-19 são mostrados em médias horárias na Figura 5.10. Esse tipo de material particulado é formado a partir de processos mecânicos, como ressuspensão de poeira de solo por ventos, cinzas de combustão e emissões biogênicas naturais e  $PM_{2.5}$  são geradas por processos de combustão por indústrias, veículos e partículas secundárias, provenientes da formação de partículas na atmosfera a partir de gases, como por exemplo, a formação de sulfatos a partir de  $SO_2$  (QUEIROZ; JACOMINO; MENEZES, 2007).

Para o material particulado  $PM_{10}$ , o limite da concentração média em 24h de coletada de dados é de  $45 \mu g/m^3$ . Não há consenso sobre o assunto em como concentrações

altas, em menores intervalos de tempo, podem afetar a saúde humana, faltam estudos que correlacionem possíveis causas e efeitos.

Já para o material particulado fino  $PM_{2,5}$ , o limite da concentração média em 24h de coletada de dados é de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Também não há consenso sobre o assunto em como concentrações altas, em menores intervalos de tempo, podem afetar a saúde humana.

Figura 5.10: Concentração de material particulado ( $PM_{10}$ ) ambiente, média horária pré COVID-19. Número de amostras 77.501 (2018-2019).

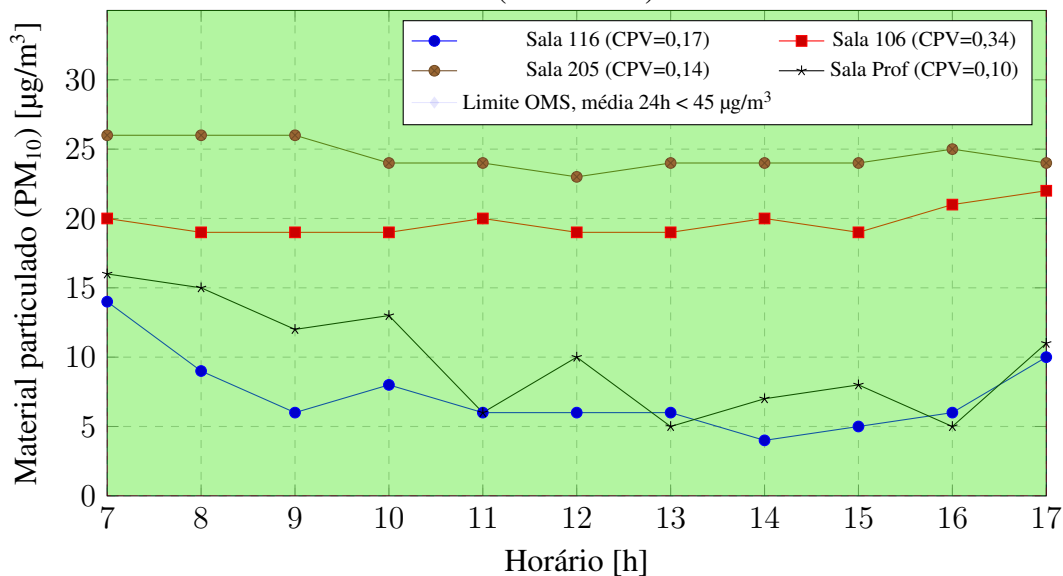
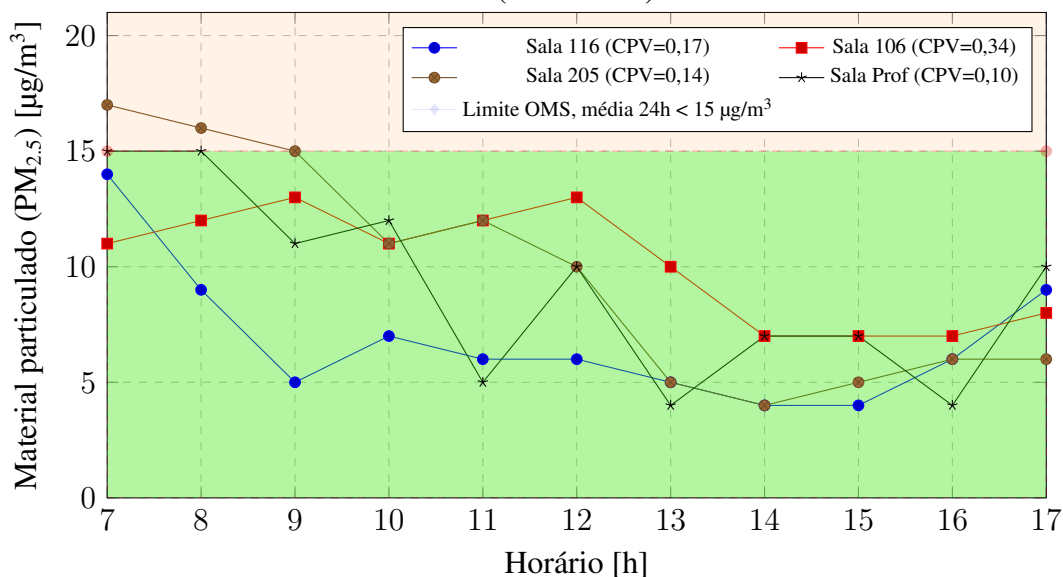


Figura 5.11: Concentração de material particulado ( $PM_{2,5}$ ) ambiente, média horária pré COVID-19. Número de amostras 77.501 (2018-2019).



As salas 205 e dos professores foram as únicas que, em um curto período, apresentaram valores acima do estabelecido pela OMS.

Tanto para os valores de  $PM_{10}$  quanto de  $PM_{2.5}$  o coeficiente CPV e as concentrações de material particulado, aparentemente, não apresentam uma correlação. Para ambos, tanto o início quanto o final do dia, provavelmente pela ressuspensão após a movimentação de entrada e saída, também apresentada para a sala dos professores ao meio dia para  $PM_{2.5}$  e para a sala dos professores para  $PM_{10}$ .

Os compostos orgânicos voláteis (VOCs) são onipresentes no meio ambiente, uma vez que existem muitas fontes (por exemplo, tráfego e emissões industriais como fontes externas, materiais de construção e mobiliário, materiais de artesanato, agentes de limpeza e produtos de higiene pessoal como fontes internas). Alguns dos VOCs estão associados a uma variedade de efeitos e sintomas graves para a saúde, como asma e reações alérgicas (SOFUOGLU et al., 2011).

Os sensores de TVOC das salas dos professores e 116 não apresentaram medidas individuais superiores a 5 ppb em nenhuma leitura. Também não apresentaram dados nulos ou zero indefinidamente. Ainda assim é possível que os sensores destas salas tenham apresentado algum defeito de funcionamento durante o período de testes. Já a sala 106 esteve no limite do aumento leve (insignificante) e o aumento significativo, mas dentro da margem de erro do próprio sensor.

Tabela 5.7: Os valores de TVOC segundo as Diretrizes de Qualidade do ARr da OMS.

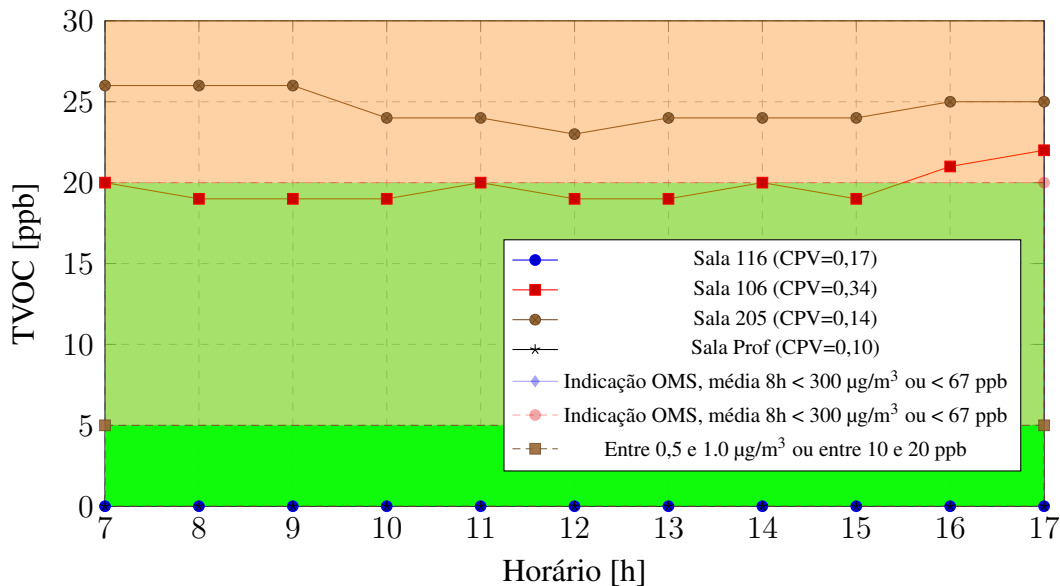
Nível	Recomendação	TVOC [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	TVOC [ppb]
Fora dos níveis recomendados	Aumento grande (não aceitável)	> 3.0	> 61
4	Aumento significativo (apenas exposição temporária)	1.0 - 3.0	20 - 61
3	Aumento leve (inofensivo)	0.5 - 1.0	10 - 20
1	Valor alvo	0 - 0.25	0 - 5

Fonte: (PARK; PARK; KIM, 2021)

A sala 205 apresentou valores constantes na região do aumento significativo, em que exposições apenas temporárias são recomendadas pela OMS (ORGANIZATION et al., 2010), conforme mostra a Tabela 5.7 Este ambiente não existe mais, uma vez que ele foi remodelado e no período pós pandemia a nova sala 217 absorveu as funções desta, com características físicas totalmente diversas.



Figura 5.12: Compostos Orgânicos Voláteis - VOC/TVOC (ppb) do ambiente, média horária pré COVID-19. Número de amostras 77.501 (2018-2019).



### 5.5.2 Análise de dados coletados pós COVID-19

Os dados utilizados para o período de análise pré pandemia foram coletados entre os anos de 2021 e 2022. A Figura 5.13 mostra as médias horárias dos valores de concentração de  $\text{CO}_2$ . A legenda traz o nome do ambiente com o seu coeficiente CPV, a fim de relacionar o mesmo com os valores encontrados. São delimitadas 3 áreas:

Acima de 1.000 ppm (limite indicado pela ANVISA).

Entre 600 e 1.000 ppm (entre alto desempenho e limite ANVISA).

Entre 400 e 600 ppm (alto desempenho).

A sala 106, que possui o maior coeficiente CPV, apresentou valores concentração de  $\text{CO}_2$  acima do recomendável para o alto desempenho apenas na parte da tarde, mas dentro do limite recomendado pela ANVISA e OMS. Um pico ocorreu de forma semelhante com a sala 116, mas apenas no horário das 14h. Todos os demais ambientes apresentaram médias horárias e concentração de  $\text{CO}_2$  abaixo de 600 ppm.

Os valores de temperatura coletados o período pós COVID-19 são mostrados em médias horárias na Figura 5.14. Com exceção da sala dos professores, que teve apenas um pico na curva de valores médios acima dos níveis indicados pela OMS e ANVISA. Já para valores abaixo dos indicados, inclusive para os preconizados pela OMS como

mínimo para ocupação, a sala 106 ficou abaixo dos 18 °C praticamente todo o período pós pandemia. Este fato é reforçado pela falta de comunicação do sensor com o banco de dados no período mais próximo do final do ano, quando as temperaturas do ambiente ficam mais altas. Ou seja, no retorno as aulas, que ocorreu durante o período mais frio do ano, a falta de condicionamento térmico prejudicou o rendimento dos estudantes deste ambiente. Os demais ambientes apresentaram valores dentro dos valores indicados como adequados pela legislação.

Figura 5.13: Concentração de CO<sub>2</sub> por ambiente, média horária pós COVID-19 (Sala 217 c/30 pessoas, Sala Prof. c/25 pessoas). Número de amostras: 216.376 (2021-2022).

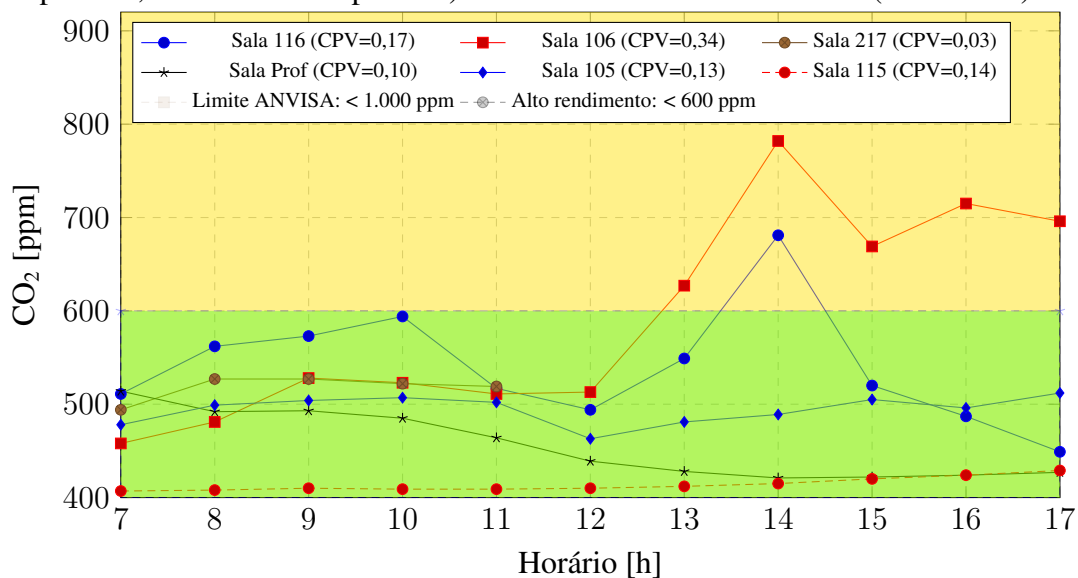
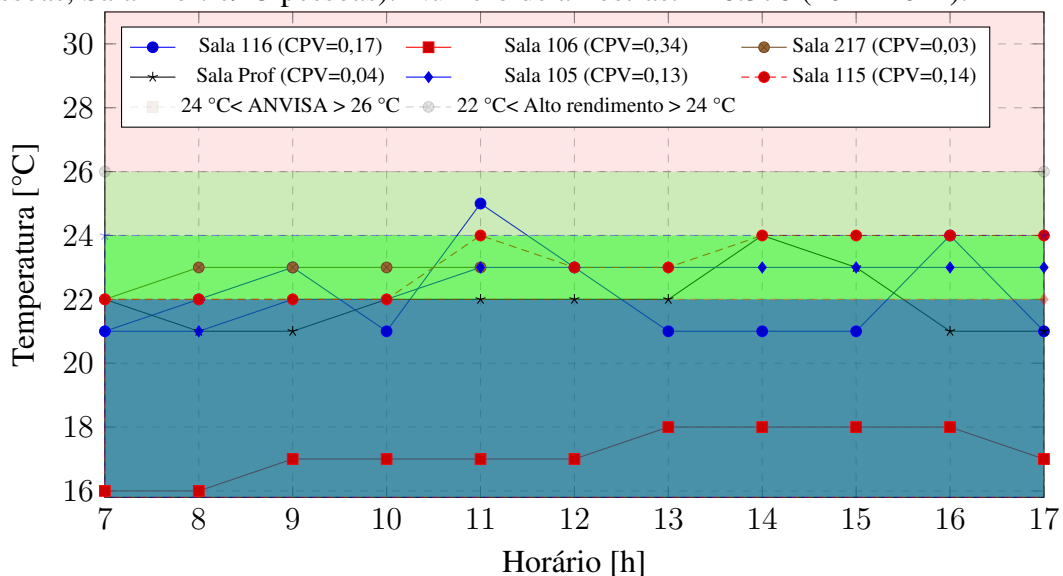


Figura 5.14: Temperatura por ambiente, média horária pós COVID-19 (Sala 217 c/30 pessoas, Sala Prof. c/25 pessoas). Número de amostras: 216.376 (2021-2022).



Os dados de umidade relativa do ar coletados no período pré COVID-19 são mostrados em médias horárias na Figura 5.15. Sem o controle da temperatura do sistema de condicionamento de ar a umidade relativa do ar ficou mais dependente do ambiente externo. Apenas a sala 106 apresentou valores fora da faixa adequada, conforme preconizam a ANVISA e OMS. As demais salas permaneceram a maior parte do período dentro da faixa adequada, com pequena exceção para o início da manhã, mas dentro da faixa de erro de medição.

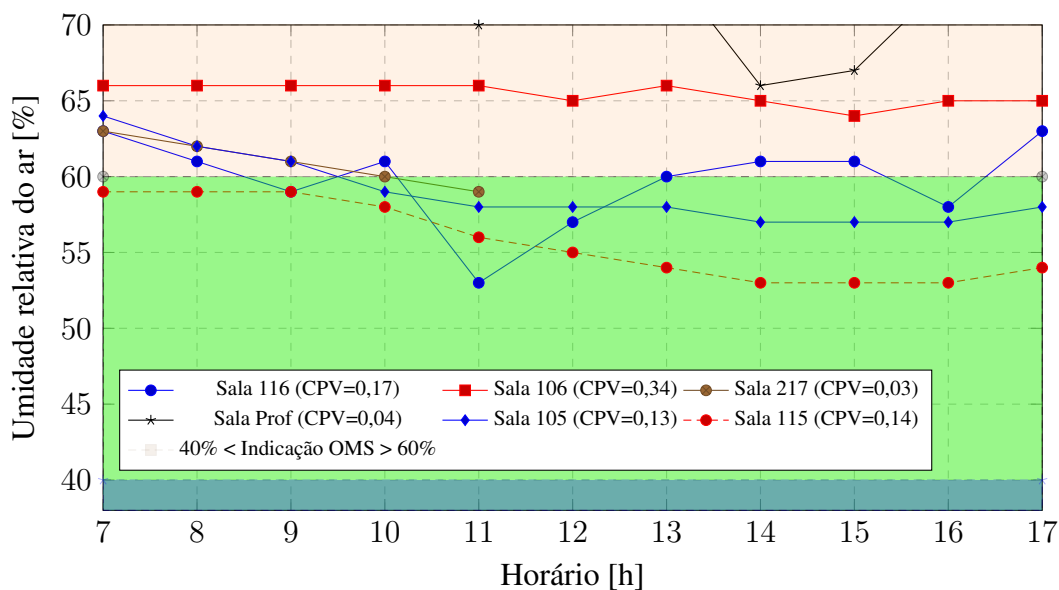
As áreas para este gráfico são:

Acima do limite indicado pela OMS

40% < Alto rendimento, OMS > 60%.

Abaixo da faixa indicada pela OMS.

Figura 5.15: Umidade relativa do ar por ambiente, média horária pós COVID-19 (Sala 217 c/30 pessoas, Sala Prof. c/25 pessoas). Número de amostras: 216.376 (2021-2022).



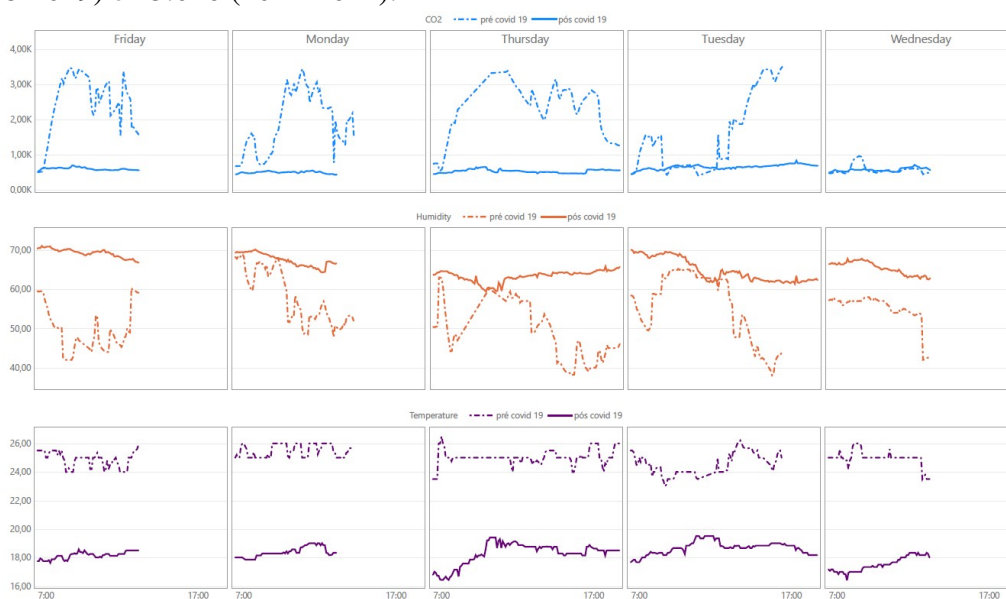
## 5.6 COMPARAR OS DADOS COLETADOS PRÉ E PÓS PANDEMIA COVID-19

### 5.6.1 Análise de dados por dia da semana e ambiente

Os dados pré pandemia COVID-19 e pós COVID-19 foram selecionados de forma a respeitar os dados coletados antes da pausa de aulas presenciais que ocorreram no início

das aulas de 2020, a partir do dia 19 de março. Foi realizada análise dos do conjunto de dados coletados antes e depois da pandemia, durante os períodos em que os ambientes estiveram ocupados, sendo que estes dados foram em relação ao CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade relativa do ar. Na Figura 5.16 é possível analisar os dados reunidos por dias da semana, para as três variáveis da sala 106.

Figura 5.16: Agrupamento de dados pré e pós COVID-19 para as variáveis CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade relativa do ar relativos a coleta na sala 106. Número de amostras 8989 (2018-2019) e 15.026 (2021-2022).



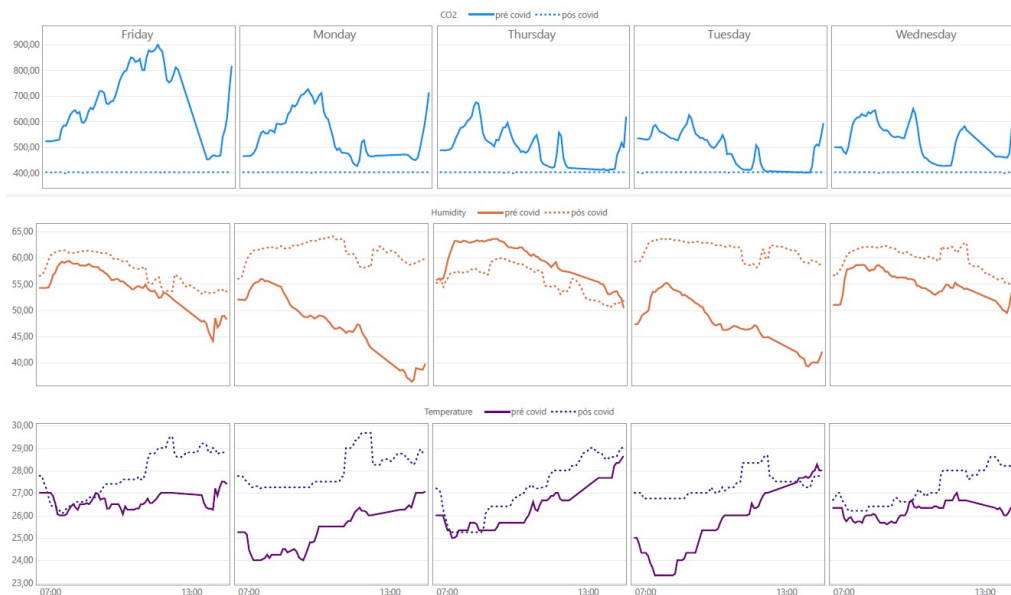
Os gráficos da sala 106 mostram os valores de CO<sub>2</sub> em concentrações mais elevadas no período do pré COVID-19 em relação ao período posterior. Os valores de temperatura e umidade relativa do ar, principalmente observando a temperatura, estiveram mais próximos de um valor de conforto térmico, entre 24°C e 26°C antes da COVID-19 do que posteriormente. Isso pode ser explicado pelo fato de que o condicionamento térmico não existia praticamente pós COVID, sendo que os meses de inverno, predominantes na coleta de dados desse período, fizeram com que a média de temperatura dos dias da semana serem reduzidas.

Os valores de CO<sub>2</sub> chegaram a ultrapassar 3.000 ppm de média em quatro dias da semana. Em segundas, quintas e sextas-feiras e, nas quintas-feiras na parte da tarde, ficaram a maior parte do período pré COVID com os valores acima de 1.000, o nível de referência da ANVISA.

Esta sala é a que possui o maior coeficiente de ocupação de pessoas por metro cúbico de ar, ou Coeficiente de Pessoas por Volume (CPV), conforme mostrado em 4.7, de 0,34 pré e pós COVID-19, o que que corrobora os dados coletados.

Na Figura 5.17 tem-se os dados reunidos por dias da semana, para as três variáveis da sala 115.

Figura 5.17: Agrupamento de dados pré e pós COVID-19 para as variáveis CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade relativa do ar relativos a coleta na sala 115. Número de amostras 17.717 (2018-2019) e 14.338 (2021-2022).



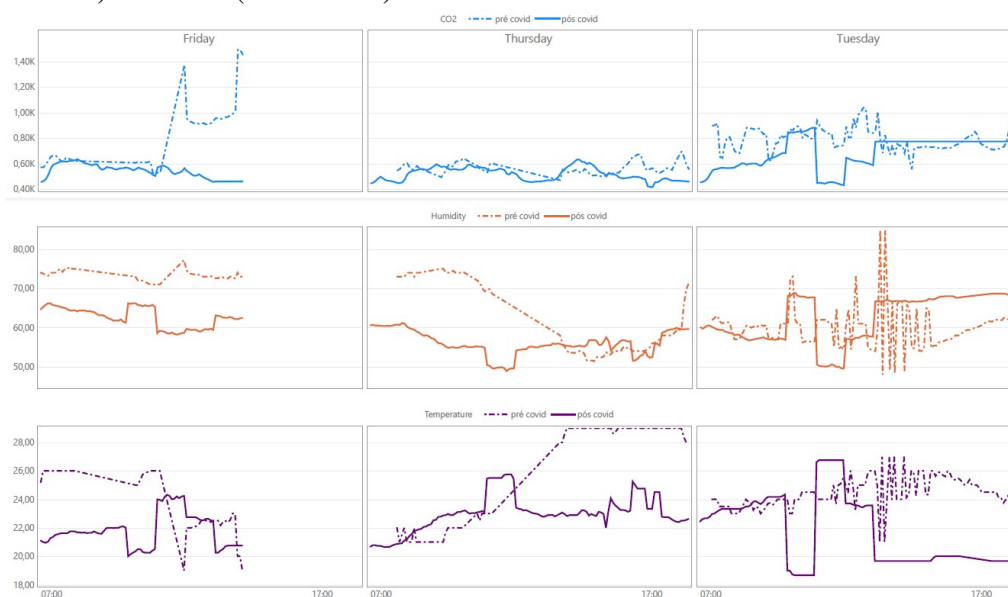
Os gráficos da sala 115, que possui um CPV de 0,14 tanto pré quanto pós COVID-19, apresentou valores de concentração de CO<sub>2</sub> sempre abaixo de 1.000 ppm. Observando os valores de conforto térmico, em especial a temperatura, os valores não tiveram grande disparidade entre os períodos, um pouco acentuada a diferença para o período do início das manhãs de quinta-feira. Faltam informações que justifiquem esse comportamento, como uma atividade semanal diferenciada neste horário.

Uma característica já citada em 4.6.1 e destacado na Figura 4.36 é que a sala 115 fica no prédio 3, com uma elevação em relação aos demais prédios de aproximadamente 14 m, como se estivesse em um pequeno morro, que os estudantes devem descer para acessar os prédios 1, 2 e 4 citados. Esta característica pode contribuir para uma melhor ventilação de todo o prédio em relação ao "vale" em que se encontram os demais. A instalação de um anemômetro poderia solucionar esta questão.

A sala 115 é destinada à Educação Infantil, Ainda assim, no período pré COVID-19 mostra que a concentração de CO<sub>2</sub> foi maior no período anterior ao da pandemia. Este dado corrobora que as ações de manter portas e/ou janelas abertas contribuíram para uma melhor ventilação do ambiente.

Na Figura 5.18 estão os dados reunidos por dias da semana, para as três variáveis da sala 116.

Figura 5.18: Agrupamento de dados pré e pós COVID-19 para as variáveis CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade relativa do ar relativos a coleta na sala 116. Número de amostras 5.708 (2018-2019) e 24.007 (2021-2022).



A sala 116 é destinada ao uso pelo Ensino Fundamental anos finais, com uma ocupação de 39 alunos tanto no período pré quanto pós COVID-19, apresentou um CPV de 0,17. Houve instabilidade na comunicação do equipamento com o servidor e muitos dados foram removidos, causando vacâncias que impediram a utilização dos mesmos nos períodos de segundas e terças-feiras. Na Figura 5.18 não há um comportamento esperado do perfil de dados das variáveis coletadas, impossibilitando uma análise com base nestes dados.

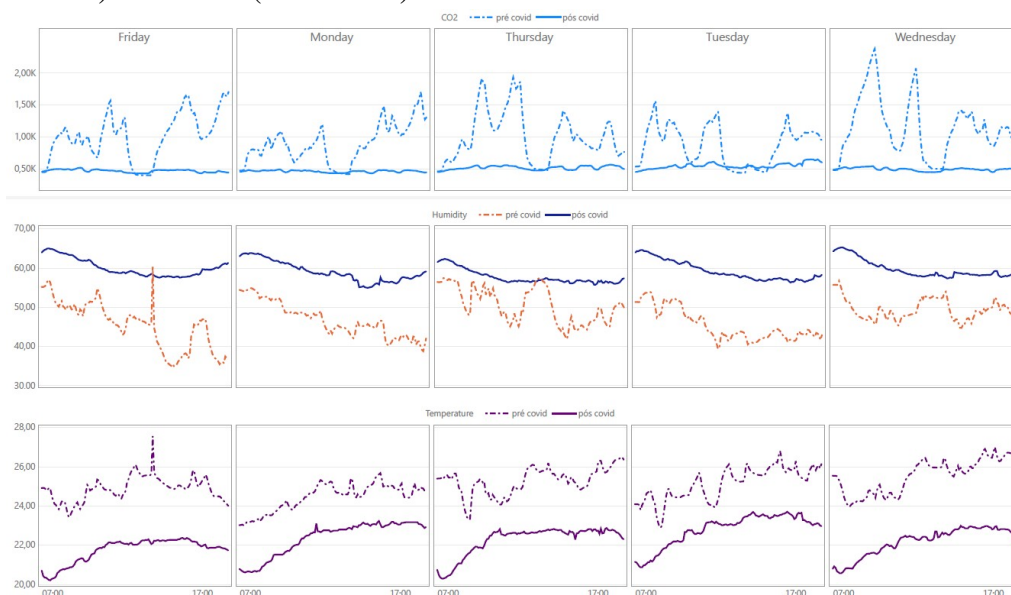
Na Figura 5.19 estão distribuídos os dados reunidos por dias da semana, para as três variáveis da sala 105.

Os dados coletados na sala 105, do Ensino Fundamental, Anos Iniciais, mostra um comportamento semelhante ao da sala 115, com valores mais elevados para a concentração de CO<sub>2</sub> para o período pré COVID-19 do que para o período pós COVID-19. Ainda assim não se mostraram tão elevados quanto os da sala 106. Com uma ocupação de 27 alunos no período pré COVID-19, apresentou um CPV de 0,13 e com 21 alunos no período pós COVID-19, um CPV de 0,10.

Os dados de quartas-feiras não foram validados em virtude da falta dos mesmos em quantidade inferior a 25% na comparação pré e pós pandemia para esta sala. Não foi possível identificar o motivo para que apenas neste dia da semana houvesse esta lacuna frequente na aquisição dos dados.

Especialmente em sextas-feiras na parte da tarde os valores de concentração de

Figura 5.19: Agrupamento de dados pré e pós COVID-19 para as variáveis CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade relativa do ar relativos a coleta na sala 105. Número de amostras 8.314 (2018-2019) e 121.584 (2021-2022).



CO<sub>2</sub> apresentaram-se mais elevados, acima de 1.000 ppm, coincidentemente com os valores mais elevados de temperatura e umidade relativa do ar mais baixos. Em terças-feiras os valores de concentração de CO<sub>2</sub> também se mostraram consistentemente maiores no período pré pandemia em relação ao pós pandemia. Estes perfis corroboram o esperado, uma melhor ventilação devido à conduta relativa a abertura de portas e/ou janelas auxiliam de forma efetiva a renovação do ar respirado por um ar externo, não respirado.

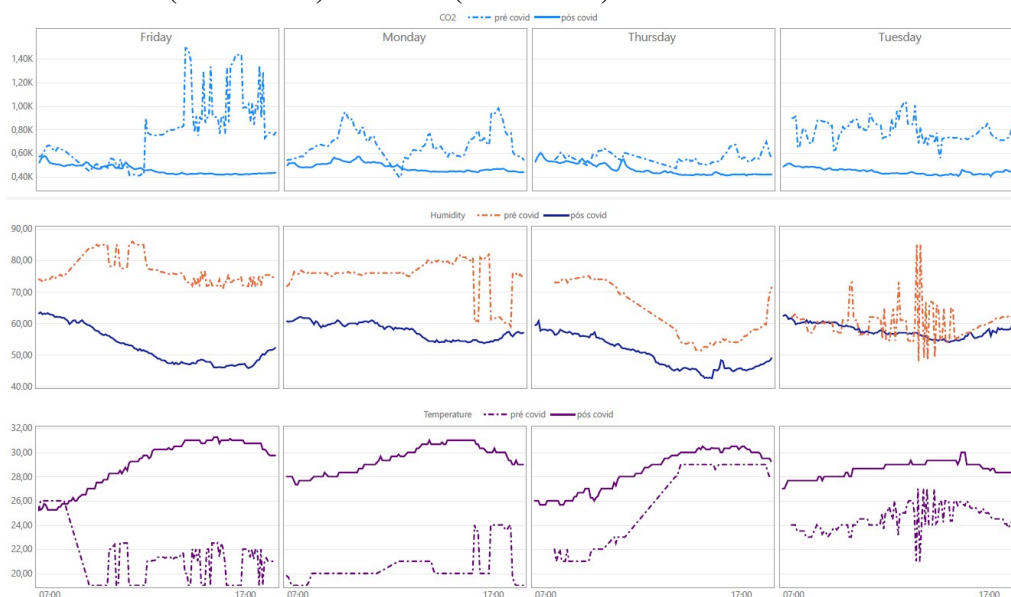
Na Figura 5.20 estão os dados reunidos por dias da semana, para as três variáveis da sala 205, que era um laboratório de informática antes da pandemia e que após a reforma foi reestruturada em uma novo ambiente, como uma laboratório de novas tecnologias, na sala 217.

Os dados plotados da Figura 5.20 não podem ser comparados de forma quantitativa, pois são ambientes diferentes, como já comentado em 4.6.1.5, com área de 66,6 m<sup>2</sup> antes da pandemia e com área de 132,1 m<sup>2</sup> após a pandemia. Ainda assim é possível verificar que os valores pré COVID-19 de concentração de CO<sub>2</sub> estavam acima da baseline do ar externo e alguma vezes acima de 1.000 ppm.

### 5.6.2 Análise de dados por variável e ambiente

Uma das análises realizadas foi a comparação de cada ambiente que foi monitorado tanto antes quando após a pandemia (cinco ambientes) e as variáveis que foram

Figura 5.20: Agrupamento de dados pré e pós COVID-19 para as variáveis  $CO_2$ , temperatura e umidade relativa do ar relativos a coleta na sala 205, dos professores. Número de amostras 16.887 (2018-2019) e 22.861 (2021-2022).



medidas tanto antes quanto após a COVID-19 (três variáveis).

### 5.6.2.1 $CO_2$

Na Figura 5.21 é possível verificar os valores foram superiores no período pré pandemia, quando não havia uma ventilação maior, com a abertura de portas e/ou janelas, a fim de atender os requisitos das autorizadas quanto os cuidados sanitários necessários. Em valores absolutos as concentrações de  $CO_2$  variaram mais de 100% na comparação dos períodos.

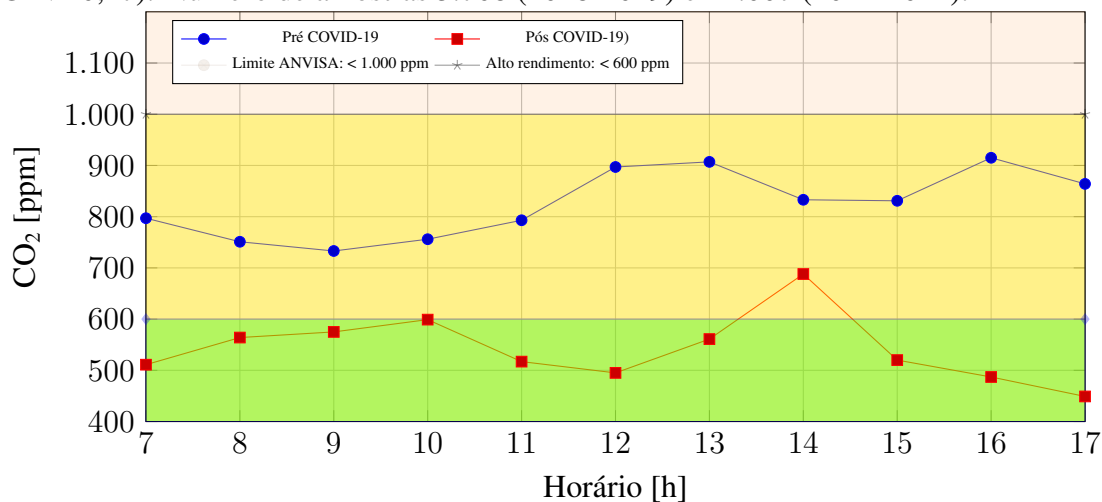
Na Figura 5.22 pode-se analisar o desvio padrão na área hachurada para o período pré pandemia, com uma menor dispersão dos valores para o período da manhã e uma maior dispersão para o período da tarde. Neste período os valores se concentram em torno da linha da média de 800 ppm. As barras mostram que os valores de maior pico ocorrem no período da tarde, bem como a dispersão. Já na Figura 5.23 a área de dispersão dos valores está muito mais estreita, além de se concentrar em torno da linha média de 500 ppm. Os valores de picos e distribuem ao longo do dia, mas com os patamares semelhantes aos de antes da pandemia.

Já na Figura 5.25 a diferença encontrada entre os períodos é mais significativa ainda. Com a abertura de portas e/ou janelas de forma contínua, os valores de  $CO_2$  no período pós pandemia ficaram sempre dentro da legislação brasileiras e a maior parte do tempo dentro da faixa de alto desempenho cognitivo. Esta sala é a que possui maior CPV



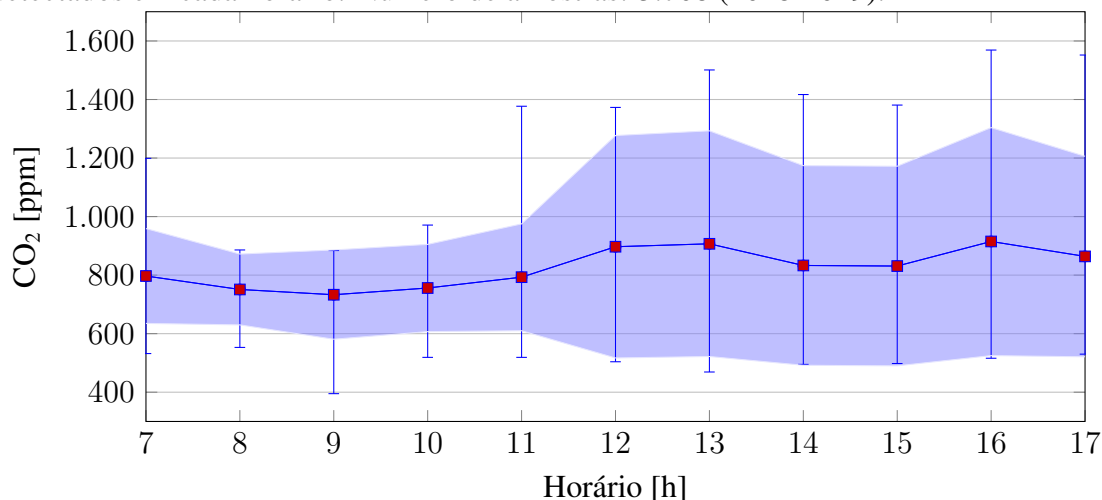
dentre os ambientes analisados e mesmo com esta característica os valores desse poluente ficaram dentro do desejado com a ventilação natural adequada.

Figura 5.21: Concentração de CO<sub>2</sub> da sala 116, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,17). Número de amostras 5.708 (2018-2019) e 24.007 (2021-2022).



Na Figura 5.26 o desvio padrão na área hachurada para o período pré pandemia, com uma dispersão homogênea ao longo de todo o dia. No início da manhã a linha média está um pouco menor e vai crescendo ao longo do dia, para valores próximos de 2.000 ppm. As barras mostram que os valores de maior pico em sua maioria estão acima de 3.000 ppm.

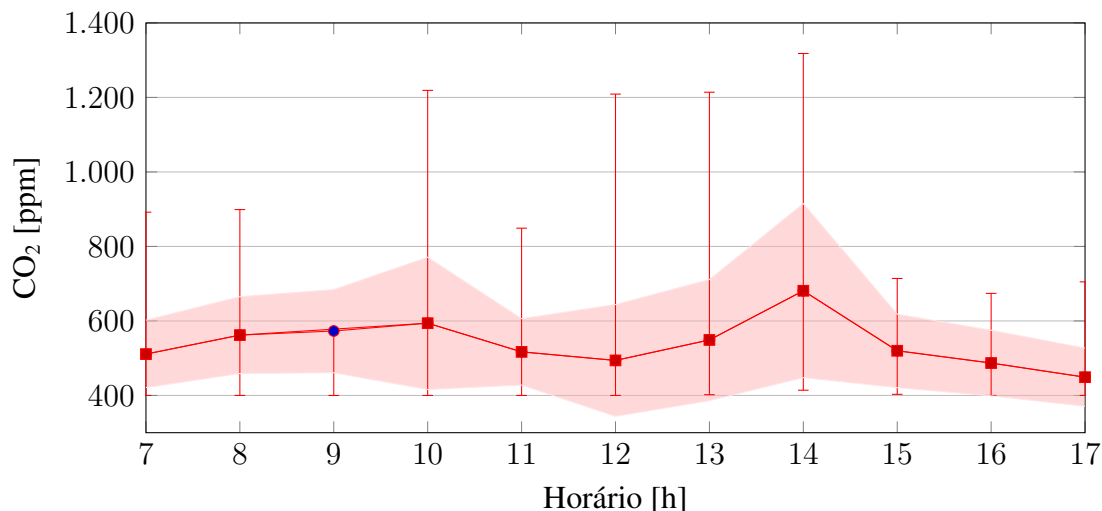
Figura 5.22: Dióxido de carbono da sala 116, Pré COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 5.708 (2018-2019).



Na Figura 5.27 a área de dispersão dos valores está mais estreita no período da manhã e aumenta a largura no período da tarde, com uma linha de média em torno de 600

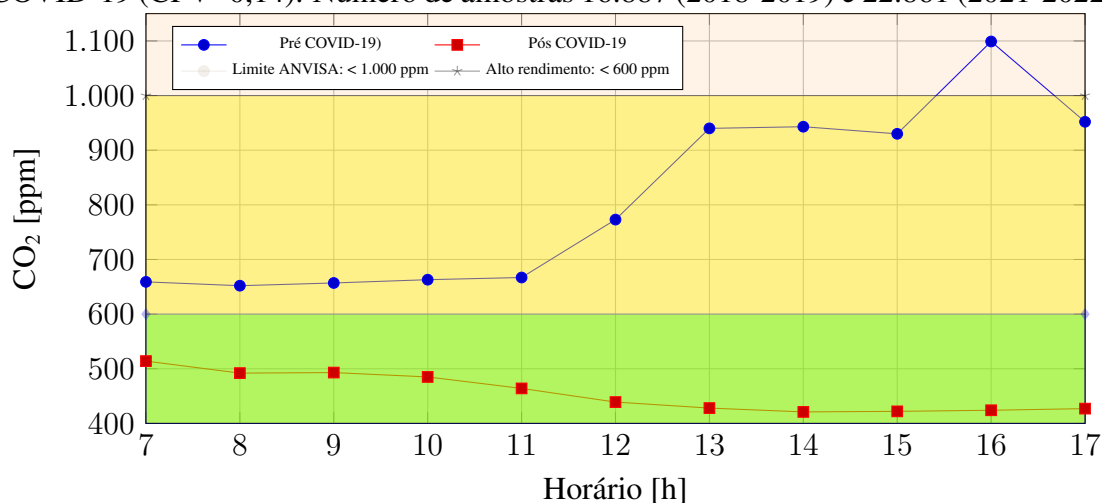
ppm. Os valores de máximo e mínimo não chegam a atingir 1.900 ppm no período pós pandemia.

Figura 5.23: Dióxido de carbono da sala 116, Pós COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 24.007 (2021-2022).



A sala dos professores está retratada na Figura 5.24 e assim como a sala 106 também apresentou notória diferença de concentração entre os períodos pré e pós COVID-19. Os valores sempre ficaram dentro da faixa de alto desempenho cognitivo no período pós pandemia, o que nunca ocorreu nas medições no período pré pandemia.

Figura 5.24: Concentração de CO<sub>2</sub> da sala dos professores, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,14). Número de amostras 16.887 (2018-2019) e 22.861 (2021-2022).



A sala 105, Figura 5.28, apresentou um comportamento em relação aos valores para a concentração de CO<sub>2</sub> no período pré pandemia com médias em torno de 800 ppm.

E, como era esperado pela hipótese deste trabalho, no período com maior taxa de ventilação, valores menores, com médias horárias em torno de 500 ppm.

Na Figura 5.29 o desvio padrão na área hachurada para o período pré pandemia se assemelhou com o da sala 106, com uma área de concentração mais estreita no período da manhã e mais larga no período da tarde, ao redor de uma média de valores um pouco acima de 800 ppm. As barras apontam para valores máximos a partir das 11h acima de 1.000 ppm.

Figura 5.25: Concentração de CO<sub>2</sub> da sala 106, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,34). Número de amostras: 8.989 (2018-2019). Número de amostras: 15.026 (2021-2022).

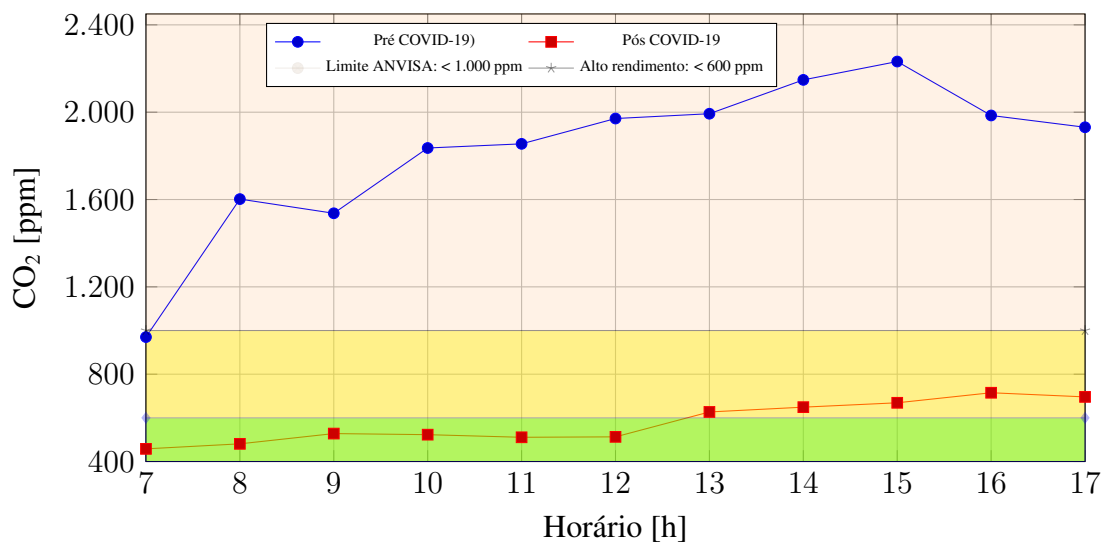


Figura 5.26: Dióxido de carbono da sala 106, Pré COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 8.989 (2018-2019).

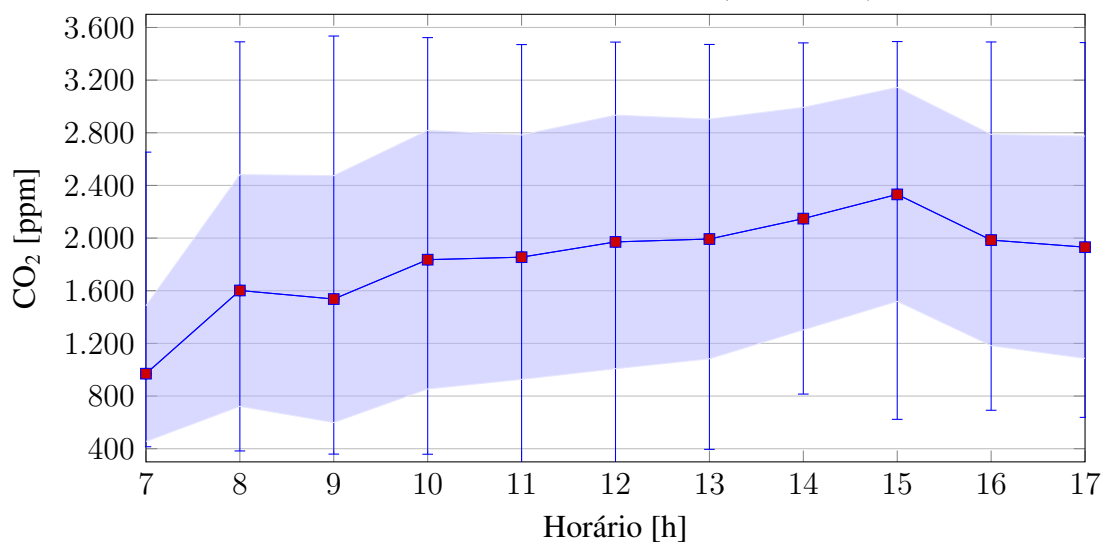
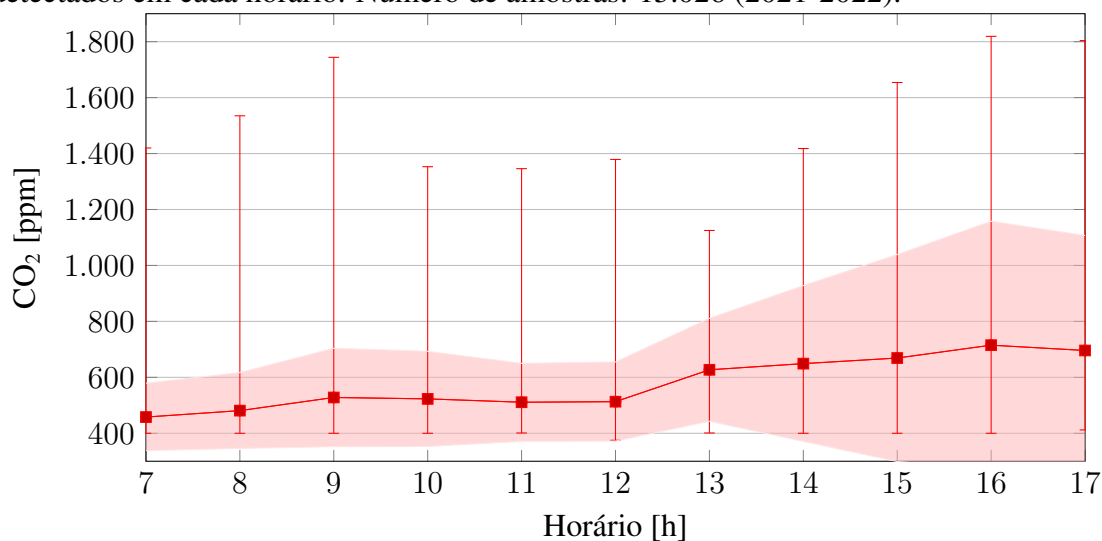


Figura 5.27: Dióxido de carbono da sala 106, Pós COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 15.026 (2021-2022).



Na Figura 5.30 a área de dispersão dos valores está mais homogênea ao longo do dia e mais estreita, ao redor de valores médios em torno de 500 ppm. Os valores máximos se concentram entre 10h e 14h, um pouco acima de 1.000 ppm no período pós pandemia.

Por fim a sala 115, com os dados representados na Figura 5.31, foi outra sala que teve uma das maiores diferenças entre as medições dos distintos períodos, com períodos acima do indicado pela ANVISA no período pré COVID-19 para as menores médias medidas no período pós COVID-19.

Figura 5.28: Concentração de CO<sub>2</sub> da sala 105, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,13). Número de amostras 8.314 (2018-2019) e 121.584 (2021-2022).

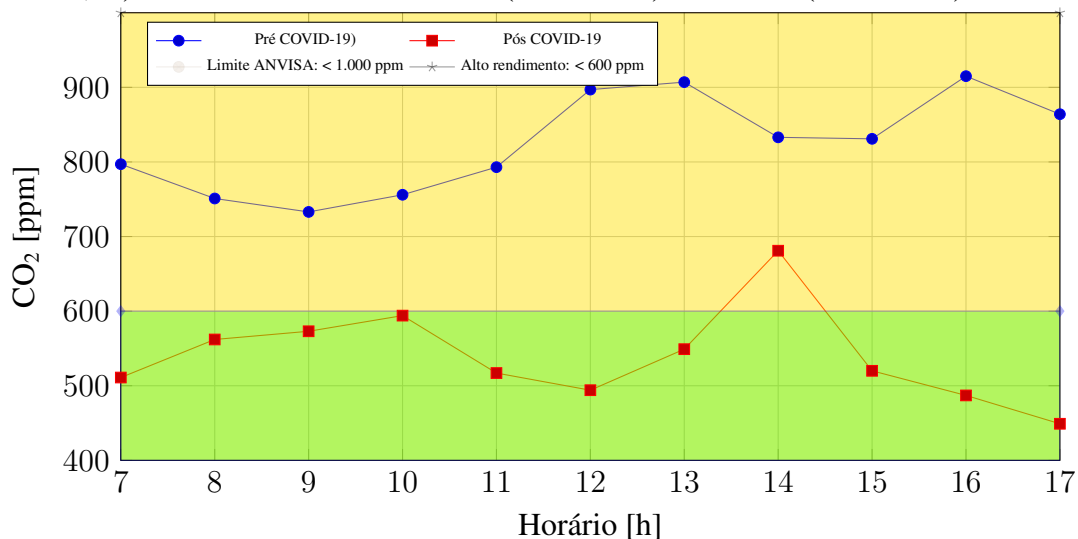


Figura 5.29: Dióxido de carbono da sala 105, Pré COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 8.314 (2018-2019).

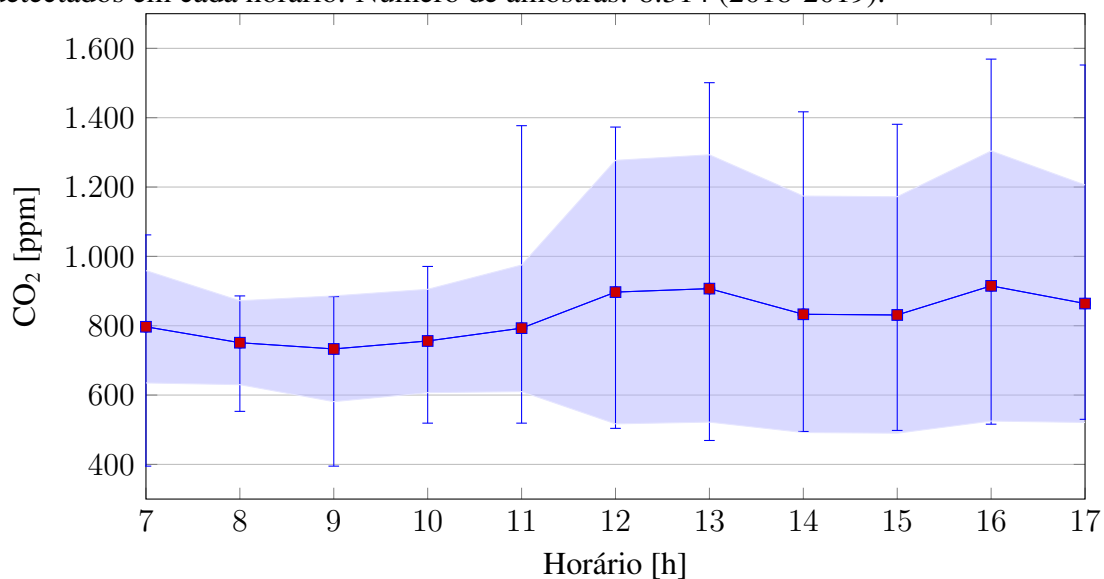
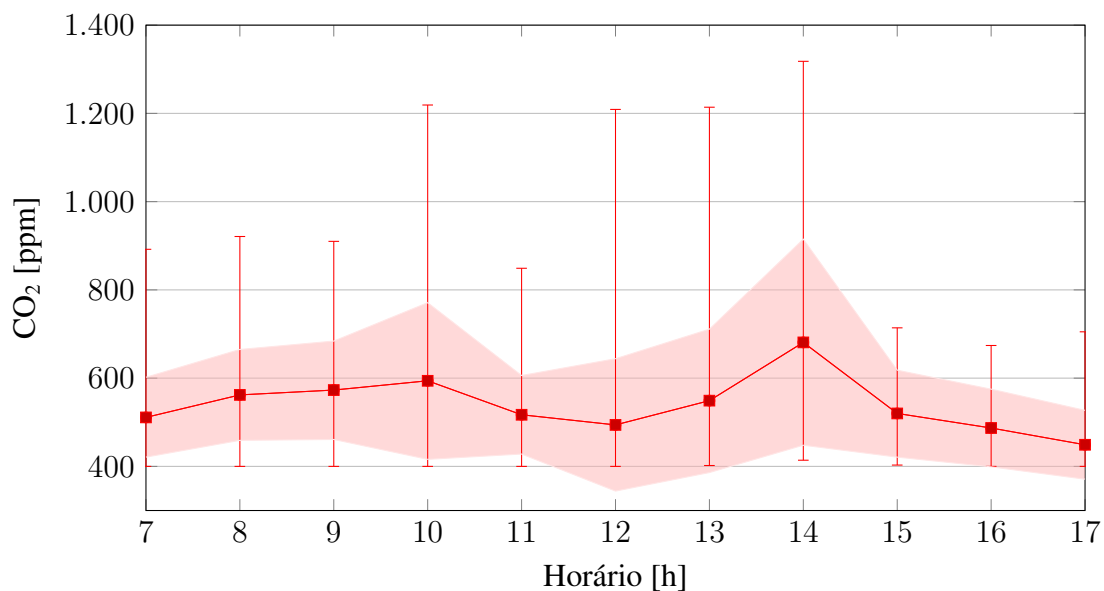


Figura 5.30: Dióxido de carbono da sala 105, Pós COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 121.584 (2021-2022).



Na Figura 5.32 o desvio padrão na área hachurada para o período pré pandemia apresentou uma área de concentração mais estreita do início da manhã até as 14h, quando teve um alargamento em torno de uma média de valores também mais elevada, em torno de 1.000 ppm, ante pouco mais de 500 ppm do período anterior. As barras de valores máximos acompanharam o crescimento, com valores máximos menores do que 2.000 ppm no período inicial do dia e próximo de 3.000 ppm no meio da tarde.

Na Figura 5.33 a área de dispersão dos valores seguiu o mesmo padrão de antes da pandemia, crescendo na parte da tarde, ao redor de valores médios em torno de 500 ppm, mas com uma grande dispersão no final do dia. Os valores máximos ficaram homogêneos ao longo do dia, um pouco acima de 800 ppm no período pós pandemia.

Figura 5.31: Concentração de CO<sub>2</sub> da sala 115, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,13). Número de amostras: 17.717 (2018-2019). Número de amostras: 14.338 (2021-2022).

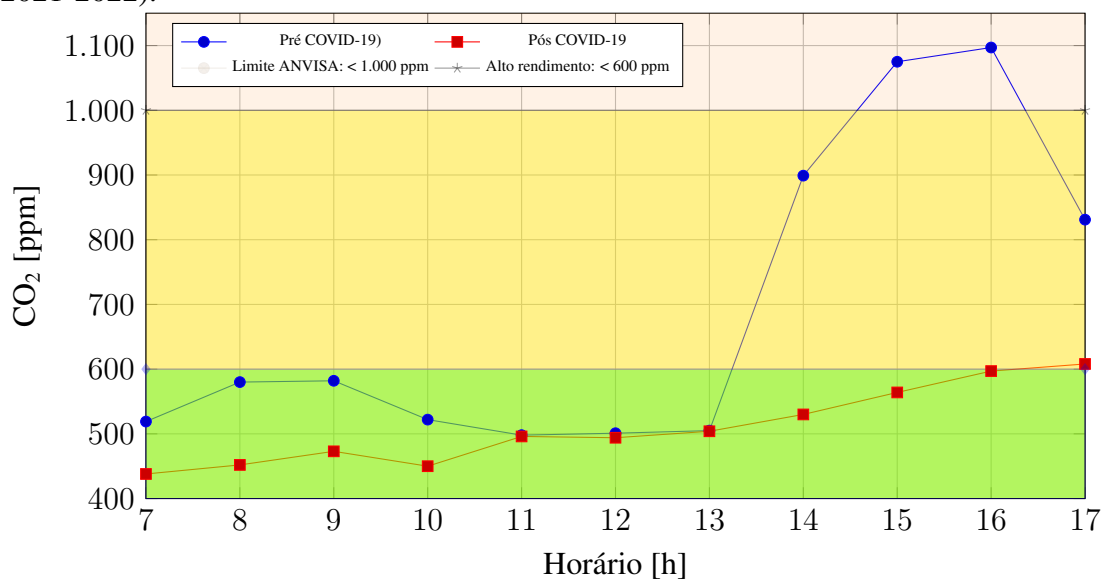


Figura 5.32: Dióxido de carbono da sala 115, Pré COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 17.717 (2018-2019).

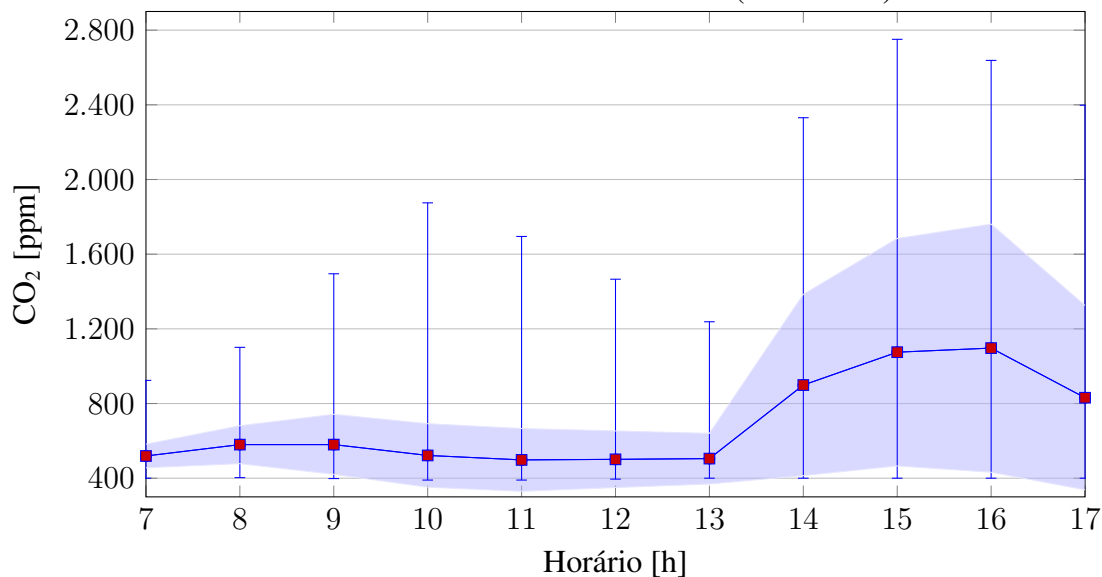
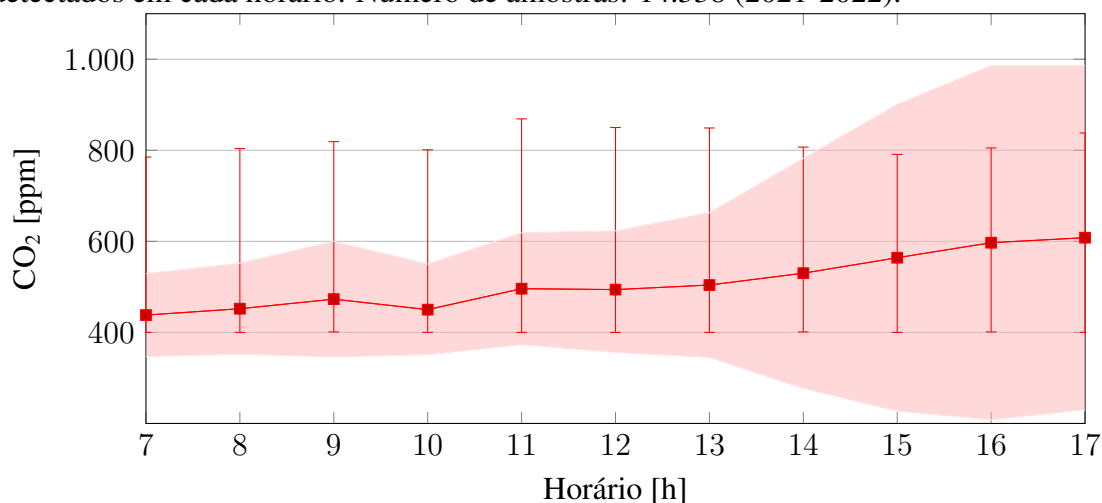


Figura 5.33: Dióxido de carbono da sala 115, Pós COVID-19. Área hachurada do desvio padrão em torno dos valores médios horários. Barras com os valores máximos e mínimos detectados em cada horário. Número de amostras: 14.338 (2021-2022).

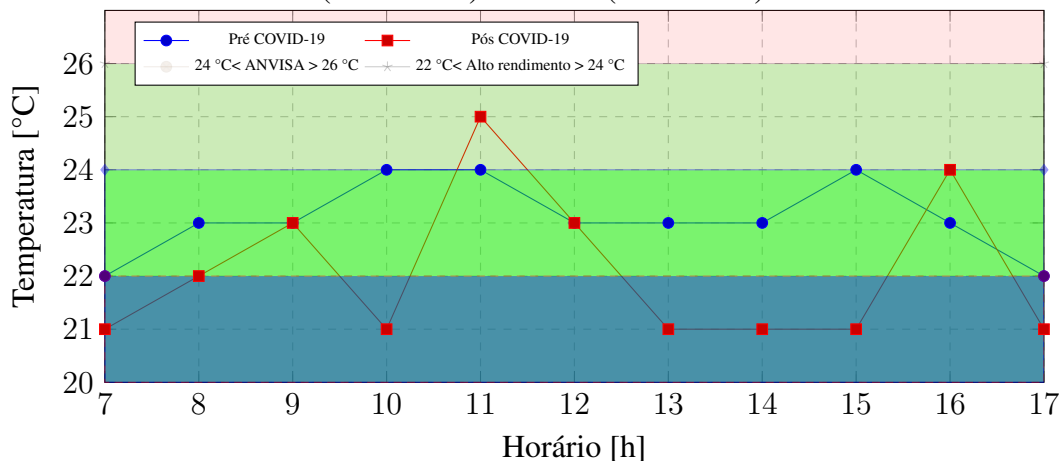


### 5.6.2.2 Temperatura

O gráfico da Figura 5.34 mostra que os valores pós pandemia ficaram um pouco abaixo do período pré pandemia na maior parte do dia. Em ambos os períodos ficaram dentro do esperado pela ANVISA ou OMS.

A sala 106, como mostra a Figura 5.35 teve de forma significativa afetado o comportamento térmico, uma vez que o condicionamento no ambiente, pouco ventilado se comparado com os demais no período pré COVID-19, mantinha a temperatura de forma constante nos 25 °C, enquanto que no período pós COVID-19, majoritariamente medido no período de inverno, mostrou que as temperaturas ficaram abaixo do desejado para o conforto térmico dos estudantes.

Figura 5.34: Temperatura da sala 116, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,17). Número de amostras 5.708 (2018-2019) e 24.007 (2021-2022).



A Figura 5.36 mostra o comportamento térmico para a sala dos professores que, com exceção de um pico, ficou a maior parte do tempo dentro do esperado pela ANVISA ou OMS. Os valores foram um pouco maiores no período pré pandemia em relação aos pós pandemia, provavelmente pelo comportamento necessário na abertura de portas e/ou janelas, condicionando o valor interno com o externo, sem um condicionamento de ar forçado.

Figura 5.35: Temperatura da sala 106, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,34). Número de amostras 8989 (2018-2019) e 15.026 (2021-2022).

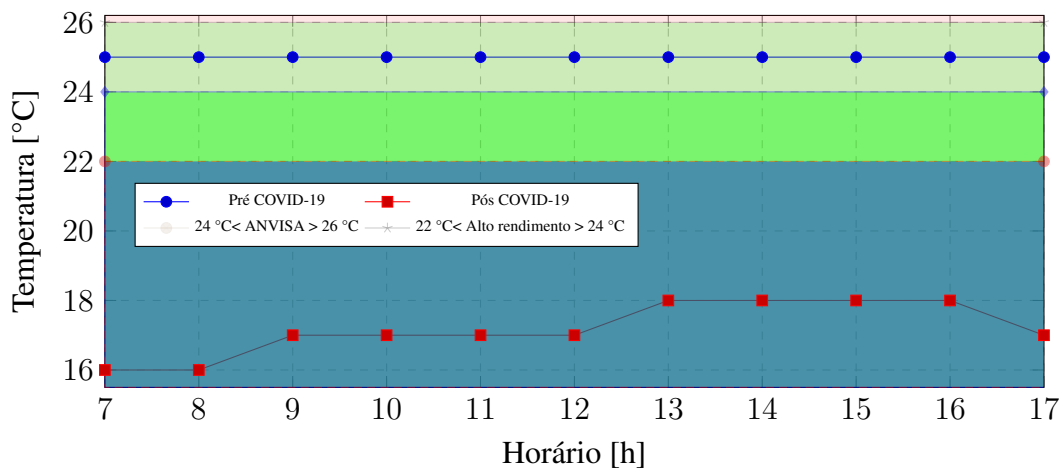
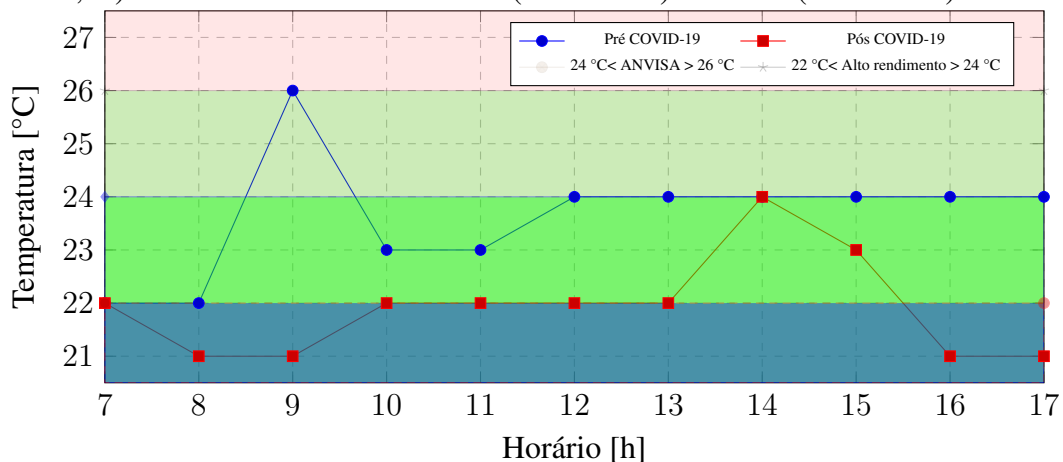


Figura 5.36: Temperatura da sala dos professores, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,14). Número de amostras 16.887 (2018-2019) e 22.861 (2021-2022).



A sala 105 tem os seus valores de temperatura mostrados na Figura 5.38. Com a característica de ser uma sala sempre bem ventilada, não apresentou significativas alterações entre os períodos pré e pós pandemia.

A Figura 5.38 mostra os valores da sala 115, com uma queda para os valores no



período pós pandemia. Ainda assim, com exceção do final da tarde, dentro da margem de erro, apresentou os valores como adequados para ANVISA ou OMS.

Figura 5.37: Temperatura da sala 105, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,13). Número de amostras 8.314 (2018-2019) e 121.584 (2021-2022).

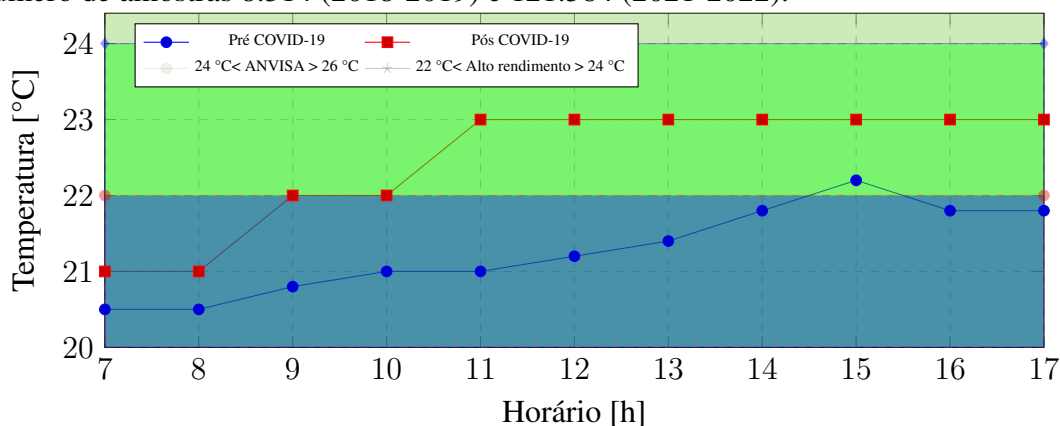
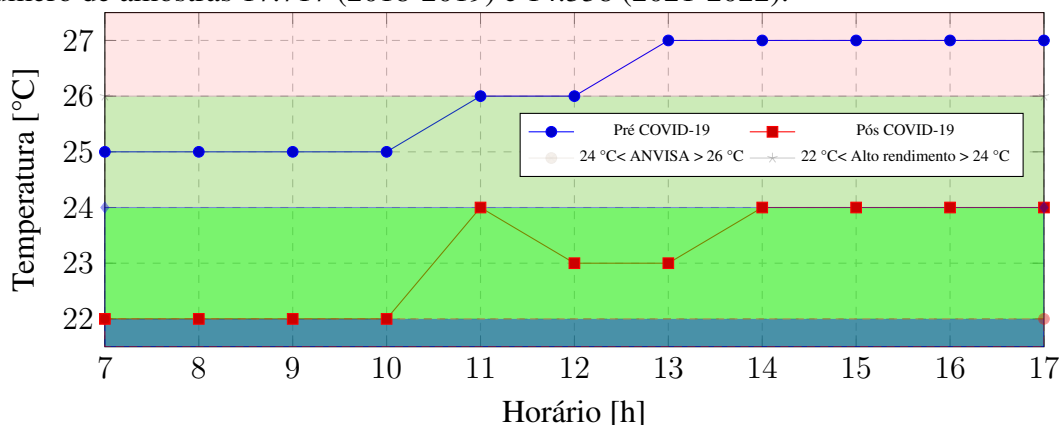


Figura 5.38: Temperatura da sala 115, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,13). Número de amostras 17.717 (2018-2019) e 14.338 (2021-2022).



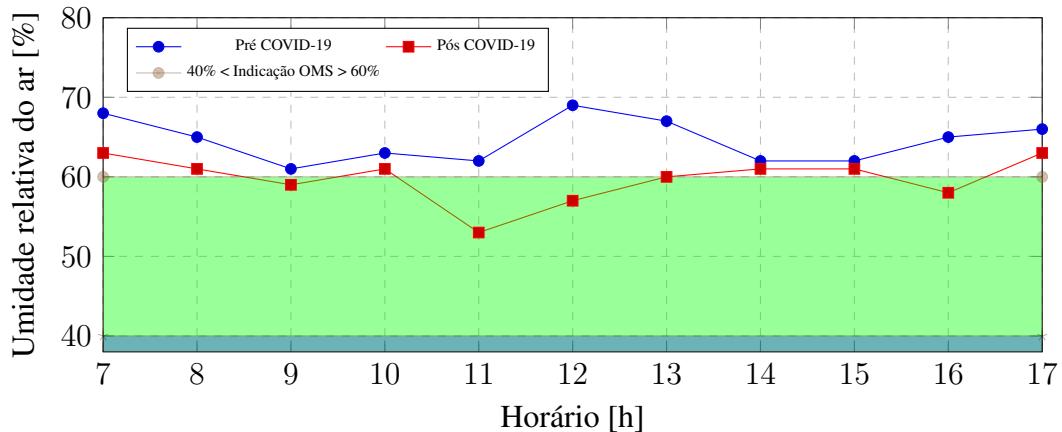
### 5.6.2.3 Umidade relativa do ar

O gráfico da Figura 5.39 mostra que os valores pós pandemia ficaram um pouco acima do período pré pandemia, mas quase sempre dentro da margem de erro. No período pós COVID-19 ficaram a maior parte do período dentro do esperado pela ANVISA ou OMS com valores um pouco acima no período pré.

A sala 106, como mostra a Figura 5.40 também teve a umidade relativa do ar afetada como a temperatura de forma significativa. Com valores adequados no período pré pandemia e mais elevados no período pós pandemia, sem o auxílio do condicionamento térmico forçado.

Da mesma forma, a Figura 5.41 mostra o comportamento térmico para a sala dos professores também teve sua umidade relativa bastante afetada, com valores acima do esperado no período pós pandemia.

Figura 5.39: Umidade relativa do ar da sala 116, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,17). Número de amostras 5.708 (2018-2019) e 24.007 (2021-2022).



A sala 105 tem os seus valores de temperatura mostrados na Figura 5.43. Com a característica de ser uma sala sempre bem ventilada, como já relatado para os valores de temperatura, não apresentou significativas alterações entre os períodos pré e pós pandemia.

A Figura 5.43 mostra os valores da sala 115 com um comportamento muito semelhante nos períodos pré e pós pandemia. Com valores mais elevados no início do dia e menores no decorrer do mesmo. São valores que estão dentro do considerado adequado pela OMS e ANVISA.

Figura 5.40: Umidade relativa do ar da sala 106, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,34). Número de amostras 8989 (2018-2019) e 15.026 (2021-2022).

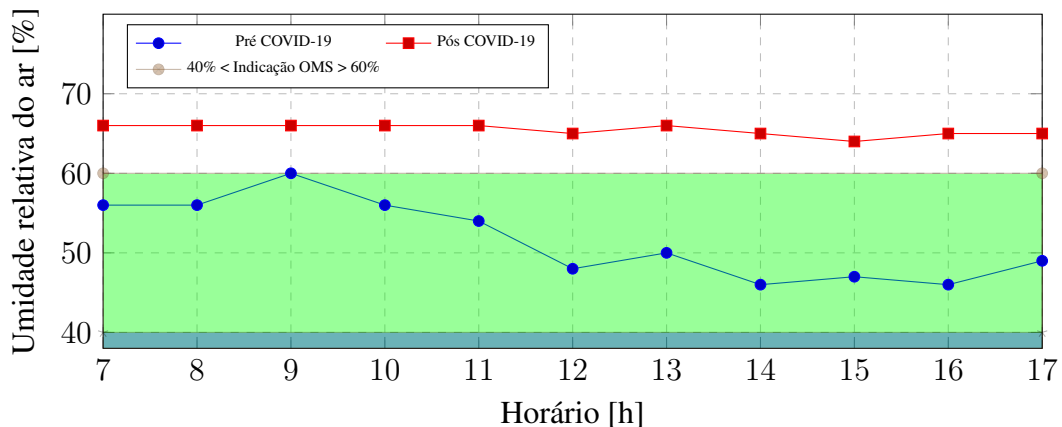


Figura 5.41: Umidade relativa do ar da sala dos professores, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,10). Número de amostras 16.887 (2018-2019) e 22.861 (2021-2022).

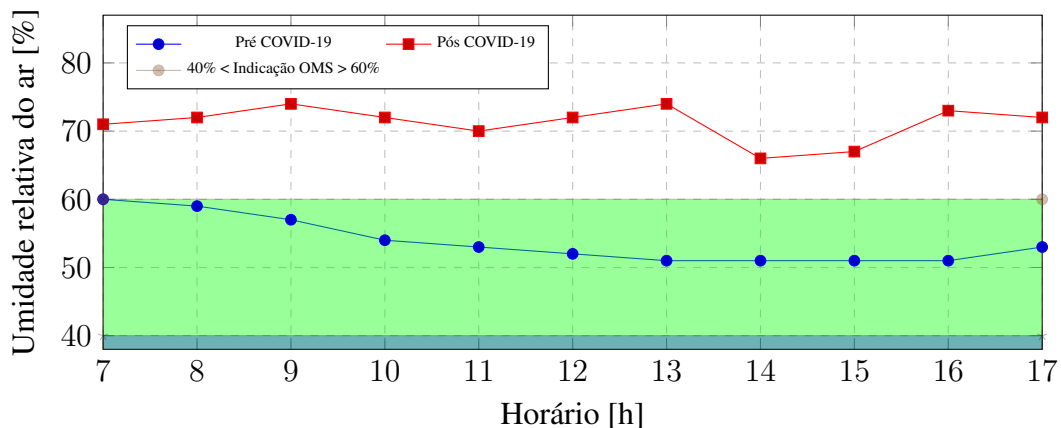


Figura 5.42: Umidade relativa do ar da sala 105, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,13). Número de amostras 8.314 (2018-2019) e 121.584 (2021-2022).

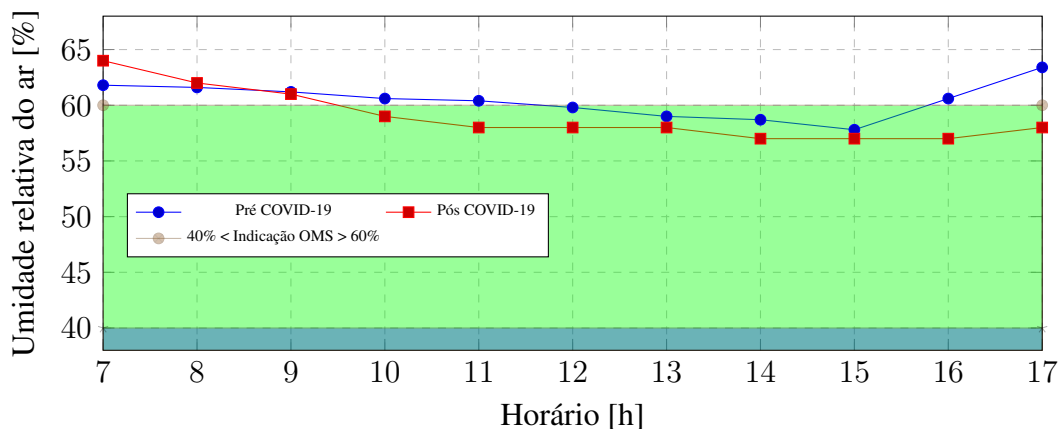
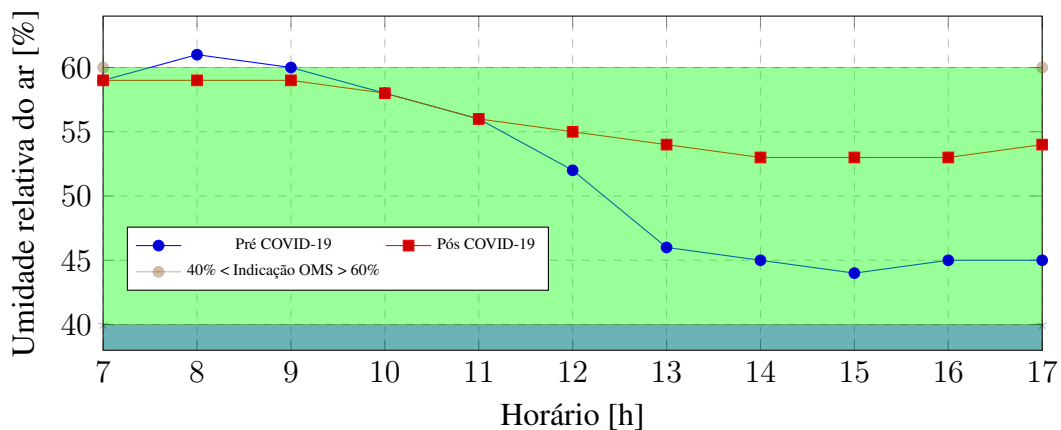


Figura 5.43: Umidade relativa do ar da sala 115, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,14). Número de amostras 17.717 (2018-2019) e 14.338 (2021-2022).



## 6 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

Os resultados do presente trabalho tiveram seus objetivos atingidos, as vezes de forma diferente da projetada inicialmente. Seja por questões técnicas ou pela pandemia mundialmente conhecida como COVID-19, que limitou por quase 2 anos a mobilidade física das pessoas ao redor mundo e gerou até mesmo uma falta de componentes semicondutores, que foram utilizados nesta pesquisa e também foram afetados por ela nesse sentido. Ainda assim, a pandemia privilegiou este trabalho, pois como havia um trabalho prévio nas salas de aula e pode ser continuado após o retorno das atividades em 2021, é um dos poucos com estes dados, pré e pós COVID-19 em relação a este assunto.

Em relação aos objetivos de "Analisar os fatores ambientais que podem afetar a saúde e cognição" e "Analisar as opções de hardware de baixo custo para atender o item anterior", chegou a uma configuração mínima adequada de hardware com comunicação Wi-Fi, que possui deve possuir a capacidade de coletar dados das seguintes variáveis ambientais e componentes de hardware:

- Temperatura, sensores SHT20 ou SHT30
- Umidade relativa do ar, sensores SHT20 ou SHT30
- Dióxido de carbono, MH-Z14 ou MH-Z19
- Material particulado, sensores PMS5003 ou PMS7003
- Compostos orgânicos voláteis, sensor SGP30

O equipamento foi descrito em duas versões de confecção, tanto com a utilização de serviços de terceiros quanto em laboratórios que possuam as ferramentas no estilo "maker" (ver 5.3). O mesmo equipamento ficou abaixo de R\$ 800,00 na versão com a utilização de serviços de terceiros e abaixo de R\$ 600,00 na versão construída em laboratório (sem impostos e valor de mão-de-obra).

Outro objetivo cumprido foi o de "Desenvolver sistemas captura, análise e visualização dados do item anterior", conforme descrito em 5.4 o mesmo foi desenvolvido com base em software livre, com a possibilidade de ser plenamente utilizado sem a necessidade de pagamento de licenças, com a necessidade de um servidor para armazenar os dados e plotar as variáveis de forma desejada.

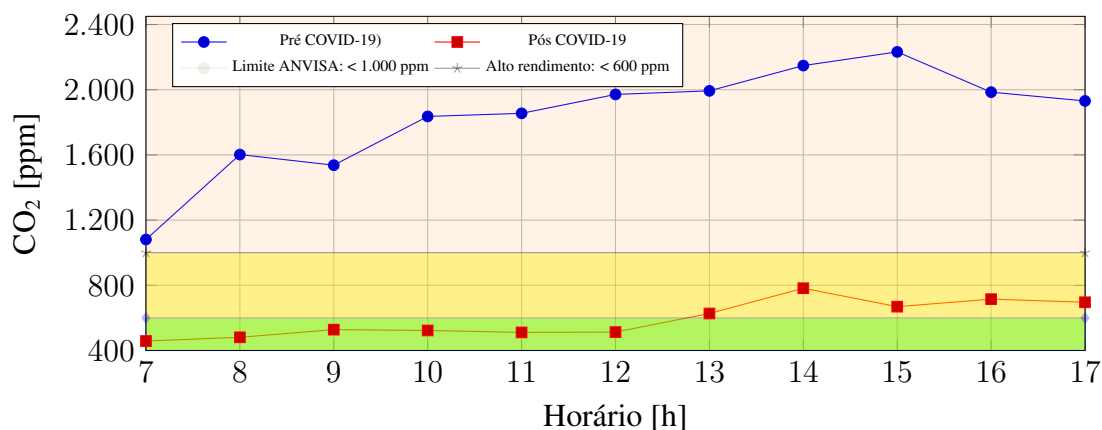
A implementação do sistema de forma metodologicamente descrita, permitirá que profissionais da educação, escolas e mesmo ações individuais possam avaliar a melhor forma de utilizar/replicar sistemas de monitoramento de qualidade do ar interno, com as

características desejadas.

O trabalho de busca de hardware adequado, com diversas opções de fabricantes ou mesmo de técnicas de implementação permitirá o funcionamento adequado dos equipamentos a serem confeccionados, buscando evitar erros comuns destacados nesta pesquisa, que levam a coleta de dados incorretos fisicamente.

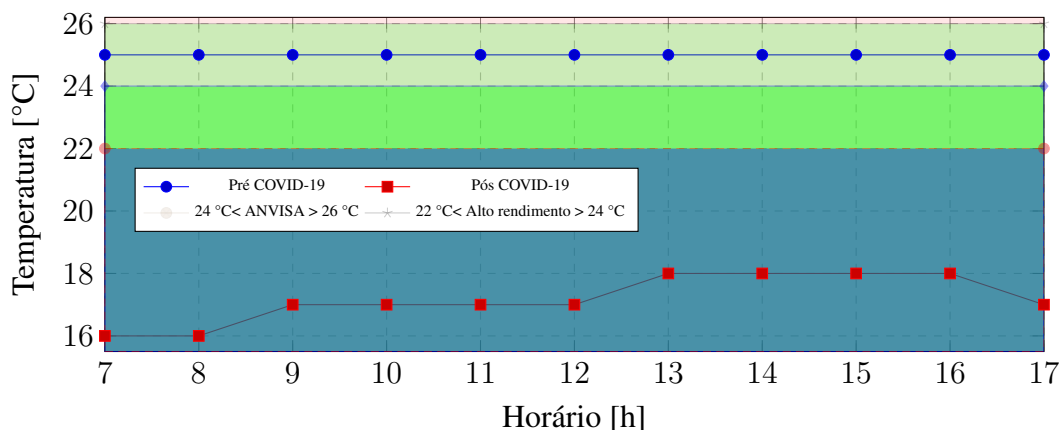
A análise dos dados permitiu concluir que ambientes internos, principalmente de edificações antigas, com características que impedem de forma fácil uma correta ventilação, necessitam de uma análise por parte dos gestores, de forma a melhorar a qualidade do ar interno sem que a melhora de uma das variáveis afete a outra de forma significativa. Um exemplo é o da sala 106 analisada nos períodos pré e pós COVID-19.

Figura 6.1: Concentração de CO<sub>2</sub> da sala 106, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,34).



Fonte: Autor.

Figura 6.2: Temperatura da sala 106, média horária pré e pós COVID-19 (CPV=0,34).



Fonte: Autor.

No período pré pandemia, com o condicionamento de ar ligado, os valores de tem-

peratura estavam adequados, enquanto que os valores de CO<sub>2</sub> estavam elevados. Quando a pandemia exigiu que as portas e/ou janelas fossem abertas, mesmo nos períodos que o sistema foi ligado, ele não foi capaz de elevar o suficiente a temperatura em dias frios, por outro lado os valores de CO<sub>2</sub> ficaram adequados.

O exemplo citado mostra que não é simples manter o ambiente adequado sem um monitoramento contínuo das variáveis ambientais dos poluentes. Rápidas aberturas de portas e/ou janelas, como citado em trabalho prévio (TAROUÇO et al., 2017), mostrou-se eficiente, em um ambiente com condicionamento de ar, para baixas os níveis de concentração de CO<sub>2</sub> de forma eficiente, sem perder a qualidade do conforto térmico.

Também é possível concluir que ambientes que possuam um coeficiente de ocupação de pessoas por metro cúbico de ar (CPV) maior, necessitam de um cuidado maior. Já ambientes com um CPV baixo tender a ter um ambiente adequado, aqui reportado tanto nos períodos pré quanto pós pandemia.

As concentrações de CO<sub>2</sub> das salas de aula quando comparadas em relação aos seus valores médios horários, dispersão e valores máximos tiveram comportamentos semelhantes em todas elas, guardadas suas peculiaridades. Nas Figuras 5.22, 5.23, 5.26, 5.27, 5.29, 5.30, 5.32 e 5.33, os valores de antes da pandemia, com uma menor taxa de ventilação sempre se mostraram maiores antes da pandemia do que após a pandemia, no período em que as portas e/ou janelas eram obrigatoriamente mantidas abertas, como norma de conduta da escola. Para trabalhos futuros é possível elencar aprimoramentos e novas pesquisas com base no projeto aqui desenvolvido:

- Aumentar o número de ambientes monitorados por escola;
- Instalar monitores externos e fazer a correlação entre o ambiente externo e o interno;
- Aumentar o número de sensores por ambiente;
- Equipar todos os equipamentos com os sensores de Temperatura, Umidade Relativa do Ar, CO<sub>2</sub>, Material Particulado e TVOC;

## REFERÊNCIAS

- ACKLEY, A. U. Measuring indoor environmental quality (ieq) in a national school property portfolio. **Victoria University of Wellington. Open Access Victoria University of Wellington Te Herenga Waka. Published Doctoral Thesis. doi**, v. 10, 2021.
- AMÂNCIO, C. T.; NASCIMENTO, L. F. C. Asma e poluentes ambientais: um estudo de séries temporais. **Revista da Associação Médica Brasileira**, SciELO Brasil, v. 58, p. 302–307, 2012.
- BADURA, M. et al. Evaluation of low-cost sensors for ambient pm2. 5 monitoring. **Journal of Sensors**, Hindawi, v. 2018, 2018.
- BUDDE, M. et al. Feinphone: Low-cost smartphone camera-based 2d particulate matter sensor. **Sensors**, MDPI, v. 19, n. 3, p. 749, 2019.
- BULOT, F. M. et al. Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 9, n. 1, p. 1–13, 2019.
- BUOLI, M. et al. Is there a link between air pollution and mental disorders? **Environment international**, Elsevier, v. 118, p. 154–168, 2018.
- CAIXETA, D. S. et al. Monitoramento da qualidade do ar interior de uma escola da rede pública localizada no município de cuiabá-mt. **ES Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 20–28, 2016.
- CANHA, N. et al. Indoor air quality in primary schools. **International Journal of Environment and Pollution**, Inderscience Publishers, v. 50, n. 1-4, p. 396–410, 2012.
- CARVALHO, A. S.; BARONE, D. A. C.; TELES, E. O. Robótica educativa como motivação ao ingresso em carreiras de engenharia e tecnologia: o projeto roboceti. In: **Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 41.
- CASTELL, N. et al. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? **Environment international**, Elsevier, v. 99, p. 293–302, 2017.
- CLEMENTS-CROOME, D. J. et al. Ventilation rates in schools. **Building and Environment**, Elsevier, v. 43, n. 3, p. 362–367, 2008.
- COSTA, L. G. et al. Neurotoxicants are in the air: convergence of human, animal, and in vitro studies on the effects of air pollution on the brain. **BioMed research international**, Hindawi, v. 2014, 2014.
- DAPPER, S. N.; SPOHR, C.; ZANINI, R. R. Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de são paulo. **Estudos Avançados**, SciELO Brasil, v. 30, p. 83–97, 2016.
- FERREIRA, A. M. C.; CARDOSO, S. M. Exploratory study of air quality in elementary schools, coimbra, portugal. **Revista de saude publica**, SciELO Brasil, v. 47, p. 1059–1068, 2013.

FLEURY, C. A. Oficinas de robótica educacional nas escolas públicas de ensino fundamental em goiânia cláudio afonso fleury; carlos roberto da silveira junior instituto federal de ciência, educação e tecnologia de goiás-ifg.

FREITAS, M. P. P. d. et al. Anais de resumos. 2019.

GALVÃO, A. P. et al. **Robótica Educacional e o Ensino de Matemática: Um experimento educacional em desenvolvimento no ensino fundamental**. Thesis (PhD) — Universidade Federal do Oeste do Pará, 2018.

GOERGEN, R. et al. Metodologia didática para a modelagem matemática da cinemática direta e inversa de robôs industriais: um estudo de caso do robô antropomórfico. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 6, p. 2079–2092, 2018.

GRIFFITHS, M.; EFTEKHARI, M. Control of co2 in a naturally ventilated classroom. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 40, n. 4, p. 556–560, 2008.

HELLSING, V. Ú. L. **Indoor air quality in junior high schools in Reykjavik**. Thesis (PhD), 2009.

JOVAŠEVIĆ-STOJANOVIĆ, M. et al. 10.5. current status of applicability of low-cost particulate matter sensors for ambient air pollution and exposure assessment.

JUNIOR, C. R. S.; COELHO, J.; BARRA, A. Construtivismo e robótica educacional: a construção de conceitos matemáticos. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, v. 11, n. 22, 2015.

KARAGULIAN, F. et al. Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. **Atmosphere**, MDPI, v. 10, n. 9, p. 506, 2019.

LEE, H. et al. Short-term air pollution exposure aggravates parkinson's disease in a population-based cohort. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 7, n. 1, p. 1–10, 2017.

LIU, J.; LEWIS, G. Environmental toxicity and poor cognitive outcomes in children and adults. **Journal of environmental health**, NIH Public Access, v. 76, n. 6, p. 130, 2014.

MARQUES, G.; PITARMA, R. An internet of things-based environmental quality management system to supervise the indoor laboratory conditions. **Applied Sciences**, MDPI, v. 9, n. 3, p. 438, 2019.

MESQUITA, M. S. de; ARAÚJO, F. M. Diagnóstico da qualidade do ar interno das edificações do campus da unifor. **Revista Tecnologia**, v. 27, n. 2, 2006.

NONNENMACHER, D. F. et al. Desenvolvimento de um protótipo de um ambiente integrado baseado em um robô educacional visando o ensino de conceitos básicos de programação. Araranguá, SC, 2022.

OLIVEIRA, D. G. de; FONSECA, W. da S. Robótica pedagógica, uma forma lúdica para o ensino de ciências na região amazônica.

OLIVEIRA, D. G. de; FONSECA, W. da S. Robótica pedagógica, uma forma diferenciada para o ensino de ciências na região amazônica. **Educitec-Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico**, v. 4, n. 09, 2018.



ORGANIZATION, W. H. et al. **Air quality guidelines for Europe**. [S.l.]: World Health Organization. Regional Office for Europe, 2000.

ORGANIZATION, W. H. et al. Who. air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide. global update 2005. **World Health Organization**. Available from: [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0005/786](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/786), v. 38, p. E90038, 2006.

ORGANIZATION, W. H. et al. **WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants**. [S.l.]: World Health Organization. Regional Office for Europe, 2010.

PARK, Y.; PARK, W. S.; KIM, Y. B. Anomaly detection in particulate matter sensor using hypothesis pruning generative adversarial network. **ETRI Journal**, Wiley Online Library, v. 43, n. 3, p. 511–523, 2021.

PETERSEN, S. et al. The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced co<sub>2</sub> concentration on the performance of schoolwork by children. **Indoor Air**, Wiley Online Library, v. 26, n. 3, p. 366–379, 2016.

PRUDENTE, R. F. Desenvolvimento de hardware para ensino de matemática aplicando processo de gamificação. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2022.

PULIMENO, M. et al. Indoor air quality at school and students' performance: Recommendations of the unesco chair on health education and sustainable development & the italian society of environmental medicine (sima). **Health Promotion Perspectives**, Tabriz University of Medical Sciences, v. 10, n. 3, p. 169, 2020.

QUEIROZ, P. G. M.; JACOMINO, V. M. F.; MENEZES, M. Â. d. B. C. Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de sete lagoas, minas gerais. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 30, p. 1233–1239, 2007.

RAABE, A.; ZORZO, A. F.; BLIKSTEIN, P. **Computação na educação básica: fundamentos e experiências**. [S.l.]: Penso Editora, 2020.

REGNER, R. R. et al. Robótica educacional: Veículo autônomo como prática de aprendizagem de modelagem matemática na engenharia mecânica. **CRICTE**, 2017.

RIBEIRO, A. C.; BARONE, D. A.; MIZUSAKI, L. E. Robo+ edu: Project and implementation of educational robotics in brazilian public schools. In: **Robot Intelligence Technology and Applications 3**. [S.l.]: Springer, 2015. p. 495–503.

RITTER, D. et al. Mecatrônica como objeto de interação entre o curso de engenharia mecânica e o mestrado/doutorado em modelagem matemática. **Salão do Conhecimento**, 2016.

ROSBACH, J. et al. A ventilation intervention study in classrooms to improve indoor air quality: the fresh study. **Environmental health**, BioMed Central, v. 12, n. 1, p. 1–10, 2013.

SALTHAMMER, T. et al. Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution. **Environment international**, Elsevier, v. 94, p. 196–210, 2016.

SANTOS, C. F. R. dos; PINHEIRO, N. A. M. A robótica educacional e seu potencial como ferramenta de explicitação de invariantes operatórios relacionados a conceitos matemáticos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 87316–87327, 2020.

SANTOS, W. V. dos; SIQUEIRA, I. L.; VEIGA, E. F. Acionamento de motores utilizando método pid através da plataforma arduino.

SATISH, U. et al. Is co2 an indoor pollutant? direct effects of low-to-moderate co2 concentrations on human decision-making performance. **Environmental health perspectives**, National Institute of Environmental Health Sciences, v. 120, n. 12, p. 1671–1677, 2012.

SCHIRMER, W. N. et al. Air pollution in internal environments and sick building syndrome. **Ciencia & saude coletiva**, Associação Brasileira de Saúde Coletiva, v. 16, n. 8, p. 3583, 2011.

SHEHAB, M.; POPE, F. Effects of short-term exposure to particulate matter air pollution on cognitive performance. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2019.

SHI, S. et al. On site measurement and analysis on indoor air environment of classroom in university campus. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 205, p. 2200–2207, 2017.

SILVA, D. P. da. Infecções hospitalares associadas à qualidade do ar em ambientes climatizados. **Revista de Epidemiologia e Controle de Infecção**, v. 3, n. 4, p. 153–157, 2013.

SMITH, M. T. et al. Machine learning for a low-cost air pollution network. **arXiv preprint arXiv:1911.12868**, 2019.

SOFUOGLU, S. C. et al. An assessment of indoor air concentrations and health risks of volatile organic compounds in three primary schools. **International journal of hygiene and environmental health**, Elsevier, v. 214, n. 1, p. 36–46, 2011.

STRELING, T. D.; COLLETT, C.; RUMEL, D. A epidemiologia dos edifícios doentes. **Revista Saúde Pública de São Paulo**, 1991.

TALLON, L. A. et al. Cognitive impacts of ambient air pollution in the national social health and aging project (nshap) cohort. **Environment international**, Elsevier, v. 104, p. 102–109, 2017.

TAROUCO, L. M. R. et al. Internet das coisas na educação trajetória para um campus inteligente. In: **Anais dos Workshops do Congresso Brasileiro de Informática na Educação**. [S.l.: s.n.], 2017. v. 6, n. 1, p. 1220.

VALDIERO, A. C. et al. Análise da evasão discente no curso de engenharia mecânica da unijuí e proposição de soluções. **Juiz de Fora**, 2014.

VALINS, L. C. V.; ANDRADE, V. de S.; LUNARDI, R. C. Interatividade com a ciência tecnológica. In: **VI Mostra Científica**. [S.l.: s.n.], 2017.

WANG, F. et al. Ambient concentrations of particulate matter and hospitalization for depression in 26 chinese cities: A case-crossover study. **Environment international**, Elsevier, v. 114, p. 115–122, 2018.

WOLKOFF, P.; AZUMA, K.; CARRER, P. Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, Elsevier, v. 233, p. 113709, 2021.

ZHAO, Z. et al. A comparative study of asthma, pollen, cat and dog allergy among pupils and allergen levels in schools in taiyuan city, china, and uppsala, sweden. **Indoor Air**, v. 16, n. 6, p. 404–413, 2006.

ZHENG, T. et al. Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high-and low-concentration environments. **Atmospheric Measurement Techniques**, Copernicus GmbH, v. 11, n. 8, p. 4823–4846, 2018.

## APÊNDICE A — HARDWARE COM FABRICAÇÃO INDUSTRIAL

Os trabalhos prévios desenvolvidos mostraram que o uso de sensores requer qualidade na fabricação do sistema de aquisição, bem como técnicas físicas para isolamento do ambiente que se deseja mensurar não tenha influência de corpos ou materiais próximos, ou mesmo do próprio equipamento de medição.

Inicialmente foram utilizadas placas de aquisição e processamento de dados facilmente encontradas no mercado, de baixo custo, como a Arduino Uno<sup>1</sup>(Figura A.1, NodeMCU (Node MicroController Unit) com ESP8266<sup>2</sup> e NodeMCU com ESP32<sup>3</sup>, como será detalhado a seguir. Para a parte de comunicação foram utilizados módulos de comunicação do tipo ESP-01, depois passando para ESP8266 e ESP32, que já possuem a comunicação integrada.

### A.1 Placa de aquisição de dados e microcontrolador

Os trabalhos começaram em meados de 2017, com uma placa Arduino Uno R3<sup>4</sup>, com as seguintes características técnicas:

- Microcontrolador: ATmega328;
- Tensão de operação: 5V;
- Tensão de alimentação recomendada: 7-12V;
- Tensão de alimentação limite: 6-20V;
- Pinos digitais I/O: 14 (dos quais 6 podem ser usados como saída PWM);
- Pinos entrada analógica: 6;
- Corrente CC por pino I/O: 40mA;
- Corrente para pino de 3,3V: 50mA;
- Memória Flash: 32 kb (ATmega32u4) dos quais 0,5KB são usados pelo bootloader;
- SRAM: 2 kb (ATmega328);
- EEPROM: 1 kb (ATmega328).

O principal atrativo para a escolha desta placa foi a sua notória difusão entre robis-

---

<sup>1</sup><https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>

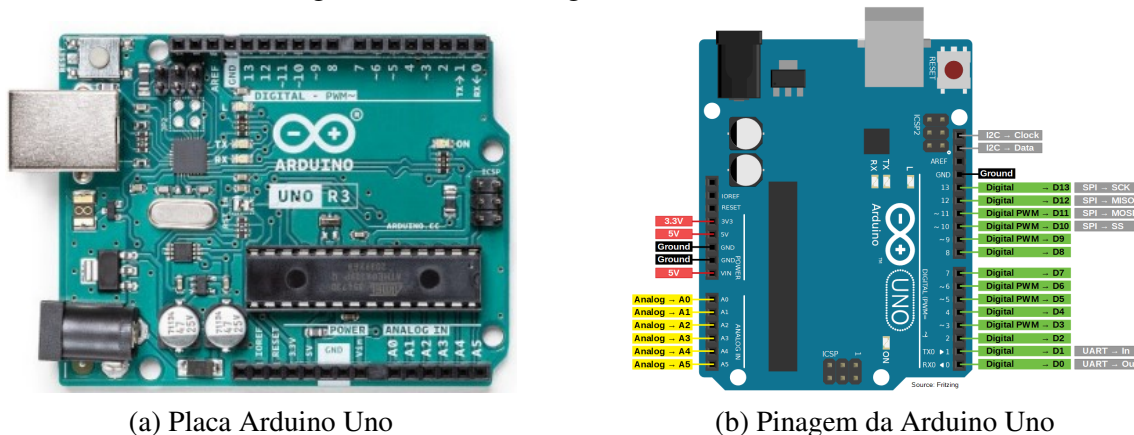
<sup>2</sup><https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266>

<sup>3</sup><https://www.espressif.com/en/products/modules/esp32>

<sup>4</sup><https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>

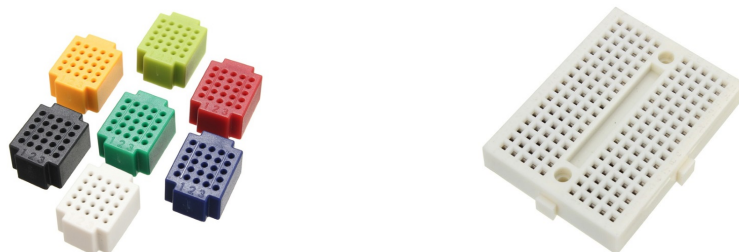
tas, que criaram uma vasta gama de bibliotecas de código para quase qualquer periférico, atuador, placa de comunicação ou sensor que se deseja utilizar neste nível técnico. Muitos projetos de pesquisa podem ser encontrados, com uma área dedicada no próprio website da Arduino<sup>1</sup>, com uma rede de colaboração muito profícua, para diversos níveis de conhecimento técnico.

Figura A.1: Placa integrada Arduino Uno R3



Para as conexões entre os periféricos e a placa foram utilizados fios simples, com terminações macho-fêmea ou macho-macho, conforme a necessidade de cada conexão, facilmente encontradas no mercado<sup>2</sup>. Ainda assim, conforme os testes foram realizados, mini protoboards eram necessárias, de 25 ou 170 pontos<sup>3</sup>, como mostra a Figura A.2.

Figura A.2: Mini protoboards para a integração de componentes sem solda.



Com a necessidade de realizar transferência de dados através de uma antena de WiFi externa e, com as portas de comunicação dos módulos de antena sendo em nível lógico de 3.3V, diferente dos 5V da Arduino, buscou-se uma solução que não dependesse

<sup>1</sup><https://create.arduino.cc/projecthub>

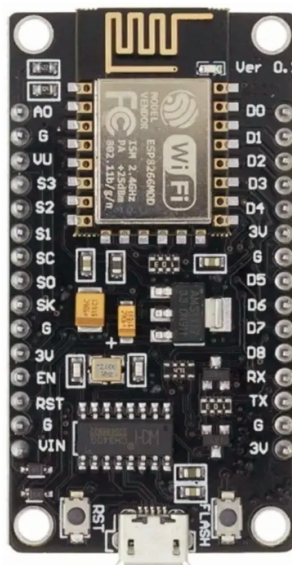
<sup>2</sup><https://lista.mercadolivre.com.br/fios-arduino>

<sup>3</sup><https://lista.mercadolivre.com.br/mini-protoboard>

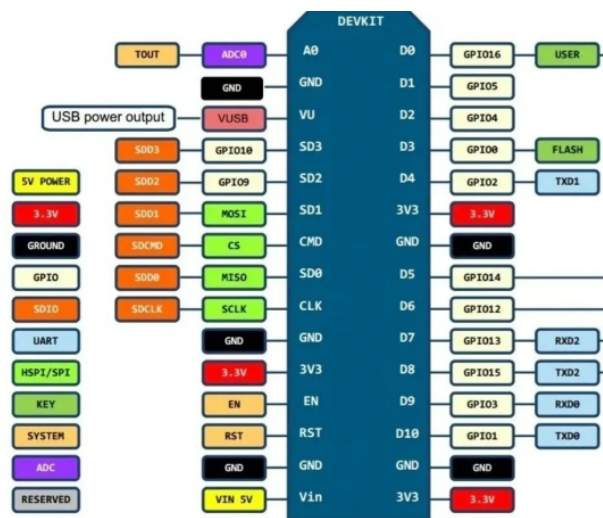
de ferramentas e habilidades para a conversão desse nível lógico (como será explicado adiante, na seção de Comunicação).

Foi escolhido o NodeMCU (Figura A.3), que é um ambiente de desenvolvimento de software e hardware de código aberto construído em torno de um System-on-a-Chip (SoC) barato chamado ESP8266. O ESP8266, projetado e fabricado pela Espressif Systems, contém os elementos fundamentais de um computador: CPU, RAM, rede (WiFi), sendo uma excelente opção para projetos de Internet das Coisas (IoT).

Figura A.3: Placa de integração com processador, memória e conectividade sem-fio ESP8266.



(a) NODEMCU com ESP8266.



(b) Pinagem de uma NodeEMCU com ESP8266.

As características técnicas do NodeMCU com ESP8266 são:

- Módulo NodeMCU Lua ESP-12E;
- Versão do módulo: V2;
- Memória flash: 4 MB;
- Tensão de operação:
  - Pinos Digitais: 3,3 V;
  - Pino Analógico: 1,0 V;
- Antena embutida, Wireless padrão 802.11 b/g/n;
- Conector micro-usb para programação e alimentação;
- Suporta 5 conexões TCP/IP;
- Portas GPIO: 13;

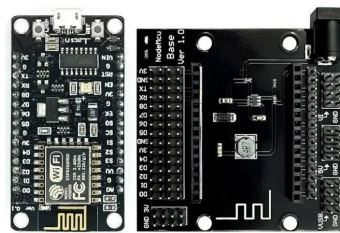
- GPIO com funções de PWM, I<sub>2</sub>C, SPI, etc;
- Resolução do PWM: 10 bits (valores de 0 a 1023);
- 01x Conversor analógico digital (ADC);
- Dimensões: 49 x 26 x 7 mm (sem considerar os pinos).

Para as conexões entre os periféricos e a placa foram utilizados os mesmos fios já escolhidos anteriormente, conforme a necessidade de cada conexão, porém foi utilizada uma base para facilitar as conexões e a alimentação, Figura A.4.

Figura A.4: Placa de integração com processador, memória e conectividade sem-fio ESP8266.



(a) NodeMCU montado sobre a base.



(b) Vista do NodeMCU e base.

Com a base NodeMCU foi acrescida a possibilidade de alimentação do NodeMCU através da placa (4.5V - 9V) ou de USB para programação.

Duas eram as maiores desvantagens para a escolha do NodeMCU com ESP8266, ao invés de uma placa Arduino, eram:

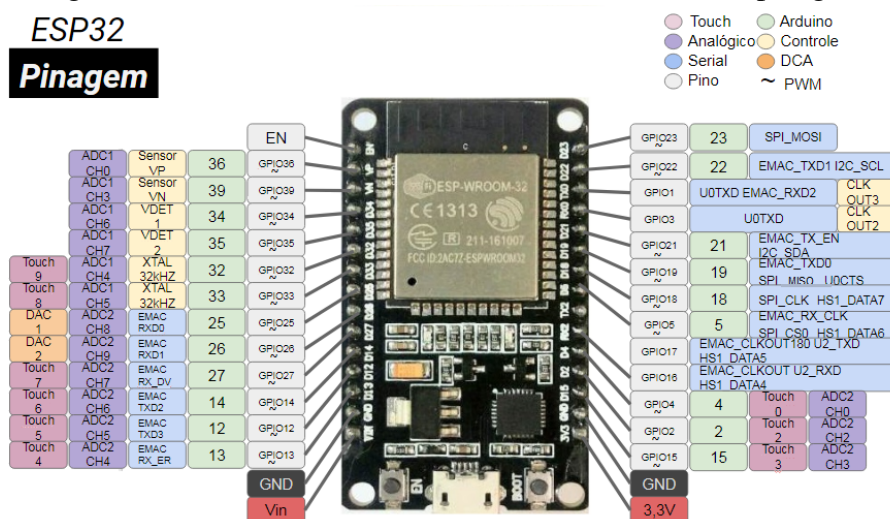
- Perda da pinagem auxiliar (suprida com a base);
- Possui apenas um pino analógico, o que limita muito o uso de sensores que não são de leitura digital, sendo que aqui também foram necessárias diversas vezes o uso de mini protoboards, como no caso do uso da Arduino;

A Expressif lançou em 2016 o microcontrolador ESP32, uma evolução da anterior ESP8266. Agora com maior capacidade de processamento, maior memória, mais pinos de portas analógicas, e um pouco mais cara também, com as principais características técnicas, sendo:

- Processador: Xtensa 32-Bit LX6 Dual Core;
- Clock: 80 à 240 MHz (Ajustável);
- Memória ROM: 448KB, Memória SRAM: 520Kb;
- Memória Flash Externa: 32-Bit de acesso e 4Mb;
- Tensão de Alimentação: 4,5 à 12,0 VDC (Pino Vin);

- Tensão de nível lógico: 3,3VDC (não tolera 5V);
- Corrente de consumo: 80 mA - típica), 500mA - máxima;
- Tipos GPIO: Digital IO (36), ADC 12-Bits (16 canais), DAC 8-Bits (2 canais);
- WiFi 802.11 b/g/n: 2.4 GHz;
- Segurança WiFi: WPA / WPA2 / WPA2-Enterprise / WPS;
- Bluetooth 4.2 BR / EDR e BLE ( Bluetooth Low Energy);
- RTC Integrado de 8Kb (Slow / Fast);
- Compatível com a IDE do Arduino;
- Dimensões: 27,5 x 51,0 x 7,0 mm.

Figura A.5: NodeMCU + ESP32, com detalhamento da pinagem.



Com a ESP32 a dificuldade da quantidade de portas analógicas foi dissolvida, ainda restava a questão da pinagem auxiliar. Uma tentativa de resolver isso foi utilizar placas de fenolite perfuradas (também chamadas de ilhadas), facilmente encontradas em diversos tamanhos e configurações<sup>1</sup> (ver Figura A.6).

O uso destas placas facilitou bastante a configuração e montagem mecânica, servindo de suporte para toda a estrutura. Porém, houve a necessidade de um domínio básico da técnica de soldar componentes eletrônicos, o que pode gerar uma dificuldade para a difusão desejada.

Com uma oferta bastante vasta para a confecção de placas de circuito impresso<sup>2</sup>, optou-se por desenhar uma placa e receber ela pronta de uma empresa, através de orçamento feito pela internet e recebimento sem necessidade de deslocamento, como qualquer

<sup>1</sup><https://www.google.com/search?q=placas+de+fenolite+ilhada>

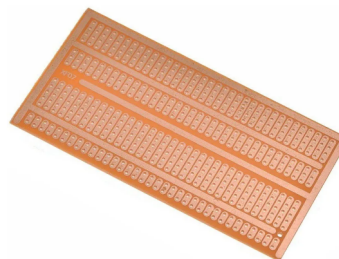
<sup>2</sup><https://www.google.com/search?q=placa+de+circuito+impresso>



Figura A.6: Placa de fenolite perfuradas, ou ilhadas.



(a) Modelo de placa de fenolite.



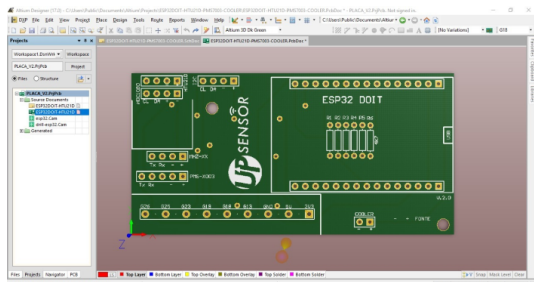
(b) Outro modelo de placa de fenolite..

compra usual da internet.

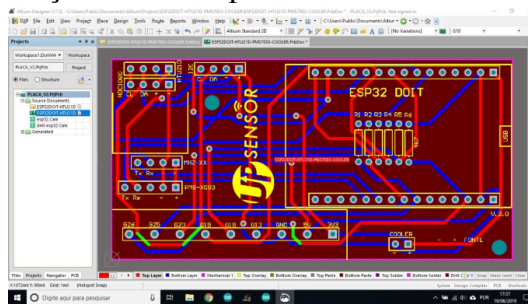
Para desenhar uma placa de circuito impresso é necessário algum conhecimento sobre eletrônica e de softwares do tipo EDA (Electronic Design Automation), como o Proteus, Altium, Eagle e o EasyEDA<sup>1</sup>, sendo o último o recomendado, com versão online e gratuita, com diversos exemplos na internet e tutorial da própria empresa<sup>2</sup>.

A seguir as imagens do primeiro projeto (ver Figura A.7, com o suporte tecnológico da Upsensor<sup>3</sup>, uma empresa spin off, gerada a partir da execução de projetos de pesquisa na UFRGS, com o apoio dos Editais Senai de Inovação de 2013 para a solução de desafios tecnológicos e de inovação, de fomento do Ministério da Ciência e Tecnologias (projeto de Prevenção de Desastres Naturais) e da Petrobras (projeto de Inspeção Interna de Dutos de Combustível, Óleo e Gás).

Figura A.7: Placa desenhada para confecção industrial personalizada. .



(a) Visual final da placa desenhada.



(b) Visual do esquemático elétrico da placa desenhada.

Fonte: Gustavo Selbach

Na Figura a seguir a placa do primeiro projeto desenhado (Figura A.8a) e uma montagem de testes finalizada (Figura A.8b). Nesta versão os sensores de umidade e temperatura eram comprados em módulos e fixados pela pinagem auxiliar diretamente na

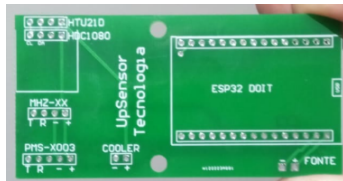
<sup>1</sup><https://easyeda.com/>

<sup>2</sup><https://docs.easyeda.com/en/FAQ/Editor/index.html>

<sup>3</sup>[www.upsensor.com](http://www.upsensor.com)

placa (Figura A.8c), com um pequeno cooler para trazer o ar externo para dentro da caixa.

Figura A.8: Primeira pcb desenhada com montagem e detalhe do sensor de umidade e temperatura com ventilação forçada para troca de calor com o meio externo.



(a) Primeira versão física da pcb.



(b) Primeira montagem.



(c) Detalhe do sensor de umidade e temperatura e ventilador.

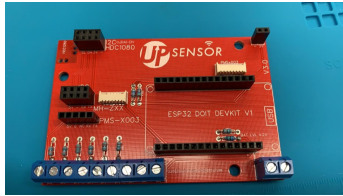
Fonte: Autor.

Como será destacado na seção de Sensores, a placa foi redesenhada, a fim de obedecer sugestões do fabricante do sensor de umidade e temperatura:

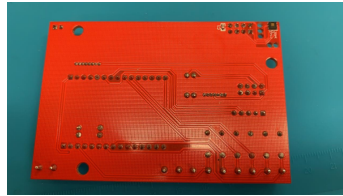
- Conexões por fios, entre sensor e microcontrolador devem ser evitadas, principalmente fios com alguns centímetros, para que não haja erro de leitura;
- Sensores embarcados devem ser dispostos de tal forma que o aquecimento produzido pelo circuito não afete a leitura, devendo ser evitada a transferência de calor por condução através da placa;

Na Figura A.9b, mostra a tentativa de embarcar o sensor de umidade e temperatura e isolar o mesmo termicamente da placa, perfazendo furos, como mostra a Figura A.9c. Este desenho também não se mostrou efetivo o suficiente, sendo necessária uma terceira versão da placa, agora com um afastamento longo do sensor de umidade e temperatura, jogando-o para fora da caixa, fazendo com que ele ficasse exposto, com uma proteção específica, Figura A.10.

Figura A.9: Primeira pcb desenhada com montagem e detalhe do sensor de umidade e temperatura com ventilação forçada para troca de calor com o meio externo.



(a) Segunda versão de pcb com bornes para conexão rápida.



(b) Verso da segunda versão de pcb.



(c) Detalhe do isolamento do sensor de umidade e temperatura integrado na placa.

Fonte: Autor.

Figura A.10: Placa de circuito impresso em sua última versão modificada, agora com o sensor de umidade e temperatura integrado e preso a um apêndice distante do restante da placa, com muita área de troca de calor.



Fonte: Autor.

## A.2 Sensores

Como foi relatado nos capítulos anteriores, um dos pilares do trabalho é o sensoriamento a ser realizado de forma automática, sem a necessidade contínua da intervenção humana. As variáveis a serem monitoradas inicialmente eram aquelas que a OMS indica como sendo os poluentes que são monitorados para controle da poluição, massivamente poluição externa, muitas vezes associada com parques fabris, atividades da economia primárias e veículos. Diversos projetos ao redor do mundo buscam compreender a eficiência e quais aplicações são ou serão possíveis com este novo tipo de tecnologia (SALTHAMMER et al., 2016). Para o trabalho em ambientes internos, os poluentes mudam um pouco, sendo que a ANVISA possui dois quadros para poluentes internos, tanto de origem orgânica quanto de origem química (ver ANEXO C, Fonte ANVISA<sup>1</sup>). Para o presente trabalho, após revisão de trabalhos correlatos, foram elencados algumas fontes químicas candidatas de análise:

- Cera, mobiliário, produtos usados em limpeza e domissanitários, solventes, materiais de revestimento, tintas, colas, etc.;
- Queima de cigarro, charuto, cachimbo, etc.;
- Poeira e fibras;
- Materiais de acabamento, mobiliário, cola, produtos de limpeza domissanitários;
- Máquinas copiadoras e impressoras a laser;
- Produtos de metabolismo humano e combustão.

Para cada potencial poluente deve-se associar um tipo de técnica de medição, o que irá impactar tanto na forma de coletar o dado da variável, quanto o custo ou mesmo a forma de aquisição do dado (medição analógica ou digital).

Além dos poluentes listados, a umidade e temperatura, além de serem parâmetros associados ao conforto térmico, também são necessários para que haja a correta utilização dos sensores em relação a interpretação dos dados analisados, normalmente afetados pela variação destes parâmetros.

Após avaliação já citada anteriormente, os sensores candidatos a serem incorporados e avaliados foram:

---

<sup>1</sup>Resolução 09 de 16 de janeiro de 2003/ANVISA – Resolução que apresenta padrões referenciais e/ou orientações para esse controle através de orientações técnicas sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Disponível em: [http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE\\_09\\_2003\\_1.pdf/](http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_1.pdf/), Acesso em: 20 abr 2021.

Tabela A.1: Associação entre poluente ou variável ambiental a ser monitorada e a técnica/sensor a ser utilizada.

Fonte de poluição	Sensor
Cera, mobiliário, produtos usados em limpeza e domissanitários, solventes, materiais de revestimento, tintas, colas, etc	sensor de compostos orgânicos voláteis
Queima de cigarro, charuto, cachimbo, etc.	sensor de fumaça
Poeira e fibras.s	sensor de material particulado
Materiais de acabamento, mobiliário, cola, produtos de limpeza domissanitários	sensor de formaldeídos
Máquinas copiadoras e impressoras a laser	sensor de ozônio
Produtos de metabolismo humano e combustão.	sensor de dióxido de carbono

Fonte: ANVISA, RE 09/2003

- sensor de compostos orgânicos voláteis;
- sensor de material particulado;
- sensor de dióxido de carbono;
- sensor de umidade e temperatura.

### A.2.1 Compostos Orgânicos Voláteis (VOC)

O sensor escolhido de VOC para testes iniciais foi o SGP30<sup>1</sup>, da empresa Sensirion, montado sobre uma MCU chamada CJMCU (de fabricante desconhecido, mas muito popular no universo dos sensores), podendo ser encontrado montado sobre outras placas de integração, então chamados de módulos, ver Figura A.11. O custo médio do sensor é em torno de USD 8.00 (sem impostos). É um sensor de gás utilizado para manter em níveis controlados a qualidade do ar de ambientes internos. É capaz de fazer a detecção de uma ampla gama de VOCs e H<sub>2</sub>, retornando em seus pinos uma leitura de Composto Orgânico Volátil Total (TVOC) e Equivalente de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>eq).O sensor possui as seguintes características técnicas:

- Fabricante: Sensirion
- Temperatura operacional: - 40 °C até + 85 °C
- Tensão de alimentação operacional: 1.8 V

<sup>1</sup><https://sensirion.com/us/products/catalog/SGP30/>

Tabela A.2: Associação entre poluente ou variável ambiental a ser monitorada e a técnica/sensor a ser utilizada.

Fonte de poluição	Sensor	Avaliação
Cera, mobiliário, produtos usados em limpeza e domissanitários, solventes, materiais de revestimento, tintas, colas, etc	sensor de compostos orgânicos voláteis	sensores de baixo custo disponíveis de difícil interpretação, necessitam de ambiente de calibração específico, laboratorial
Queima de cigarro, charuto, cachimbo, etc.	sensor de fumaça	sensores de baixo custo, fácil implementação, mas com utilidade não prática, uma vez que no Brasil não é permitido o fumo em ambientes educacionais
Poeira e fibras	sensor de material particulado	sensores gravimétricos são o padrão, mas muito caros, sensores óticos de fácil utilização e baixo custo
Materiais de acabamento, mobiliário, cola, produtos de limpeza domissanitários	sensor de formaldeídos	sensores de baixo custo disponíveis de difícil interpretação, necessitam de ambiente de calibração específico, laboratorial
Máquinas copiadoras e impressoras a laser	sensor de ozônio	sensores de baixo custo disponíveis, mas as fontes de poluição são muito específicas e pontuais, não abrangendo a maioria da população alvo
Produtos de metabolismo humano e combustão.	sensor de dióxido de carbono	sensores químicos são o padrão, mas muito caros, sensores óticos de fácil utilização e baixo custo
Conforto térmico.	sensores umidade e temperatura	sensores mais difundidos e de baixo custo

Fonte: ANVISA, RE 09/2003

- Potência nominal: 48.2 mA
- Tensão de alimentação: 1.62 V - 1.98 V
- Comunicação: protocolo I<sub>2</sub>C
- Faixa de leitura TVOC: 0 até 60000 ppb (parte por bilhão)

<sup>1</sup>a) <https://forum.airgradient.com>, b) <https://www.usinainfo.com.br/>

Figura A.11: Módulos com integração do sensor de VOC SGP30, Fonte: Links<sup>1</sup>



(a) Módulo exemplo



(b) Módulo exemplo

### A.2.2 Material particulado (PM)

O material particulado tem como medição fundamental a sua massa distribuída no ar, ou seja, medimos a concentração de matéria em relação a uma certa quantidade de volume de ar amostral. As unidades de medida comumente utilizadas são  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (micrograma por metro cúbico), e em menor aparição ppm (parte por milhão). Como descrito no Anexo D, os amostradores gravimétricos possuem filtros para cada tamanho de partícula que se deseja medir, fazendo duas medições de massa, uma antes do período de amostragem e outra depois, e a diferença detectada é a quantidade de material contido no ar. O controle de umidade e temperatura são cruciais, a fim de não se confundir a umidade além do estipulado, potencialmente contida no material a ser feita a medição.

Equipamentos de medição gravimétrica são caros e/ou de difícil operação, não sendo foco deste trabalho. Foram analisados sensores de material particulado que utilizam a técnica de Infravermelho Não Dispersivo (NDIR, Non Dispersive InfraRed), muito mais baratos e de fácil aquisição de dados, aqui uma lista com diversos disponíveis no mercado<sup>2</sup>. Com base na pesquisa relatados tanto no capítulo de Referencial Teórico, quanto Trabalhos Correlatos, alguns sensores foram escolhidos tomando como princípios fundamentais o baixo custo, a oferta no mercado brasileiro e a capacidade de ser incorporado em projetos em escolas, com menor necessidade de infraestrutura laboratorial e de pessoal especialista.

O sensor GP2Y1014AU0F<sup>3</sup>, da fabricante Sharp, foi a primeira opção de testes (Figura A.12), tendo como principal atrativo a larga difusão da linha no início dos trabalhos e o baixíssimo custo (em torno de USD 8.00, sem impostos). É uma versão de precisão em relação ao seu antecessor mais popular GP2Y1010AU0F, ambos utilizando

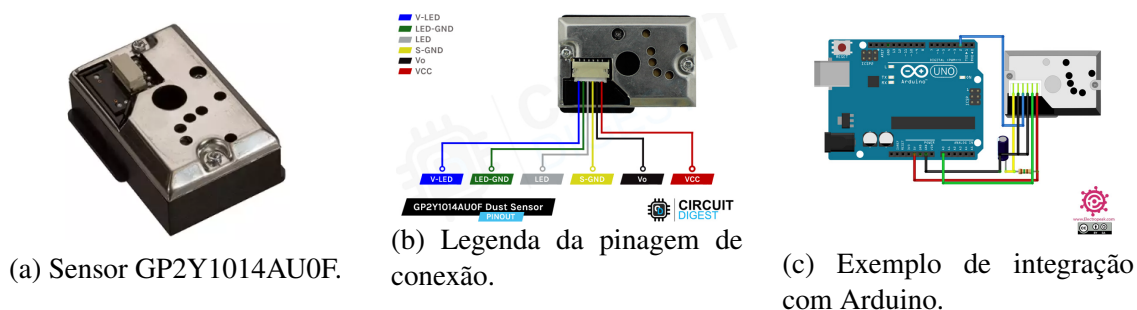
<sup>2</sup><https://en.gassensor.com.cn/ParticulateMatterSensor/list.html>

<sup>3</sup>[https://br.mouser.com/datasheet/2/365/GP2Y1014AU0F\\_SPEC-1288381.pdf](https://br.mouser.com/datasheet/2/365/GP2Y1014AU0F_SPEC-1288381.pdf)

uma saída analógica para a leitura do sensor, sendo as características técnicas principais:

- Baixo consumo de corrente elétrica: máx 20 mA;
- Tensão de operação: 4.5V 5.5V;
- Menor poeira detectável: 0.5 $\mu$ m;
- Faixa de leitura: até 580 $\mu$ g/m<sup>3</sup>;
- Tempo de resposta: menos de 1s;
- Dimensões: 46.0 x 30.0 x 17.6mm.

Figura A.12: Sensor GP2Y1014AU0F na esquerda, legenda de pinagem no centro e de integração na direita<sup>1</sup>.



Os sensores de saída analógica requerem bastante cuidado para que as leituras possam ser realizadas, pois é necessário fazer uma conversão entre os valores mínimo e máximo de saída de tensão elétrica, que é a informação do sensor, para poder ser convertido para a concentração da substância medida, normalmente de forma linear. Alguns sensores já possuem calibração de fábrica ou são auto calibráveis. A maioria dos sensores analógicos requer calibração. No caso do sensor da Sharp era necessário que se colocasse o sensor aos extremos de concentração de material particulado, tanto ar puro quanto fumaça densa, a fim de se obter as correlações entre os valores mínimo e máximo de tensão elétrica de saída e concentração de em  $\mu$ g/m<sup>3</sup> de material particulado. Não foram encontradas no mercado brasileiro, de forma fácil, as versões do sensor que facilitariam as leituras, como os sensores GP2Y1026AU0F e GP2Y1027AU0F, então não foram utilizadas.

Outra particularidade que os sensores e outros componentes possuem é o formato de conexão dos pinos, que podem variar de tamanho e de distância entre pinos. Por exemplo, o GP2Y1014AU0F usa um padrão de pinos com uma distância de 1,50 mm entre

<sup>1</sup>a) b) <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-dust-sensor-with-arduino>, c) <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-dust-sensor-with-arduino>



eles, já uma placa Arduino usa o padrão de 2,54 mm de distância entre pinos, impedindo a conexão de conectores com a mesma terminação, pois ou não encaixa em pino ou no outro pino. Para resolver isso é necessário uma placa de de fenolite auxiliar, para que a extremidade de um tipo de conector seja adaptada através da placa.

Tabela A.3: Formato de conexão dos pinos, nomenclatura comercial, distância entre pino e comprimento.

Modelo	Pitch (distância entre pinos)	Comprimento
SH	1,00mm	10cm
JSY	1,25mm	15cm
ZH	1,50mm	15cm
PH	2,00mm	20cm
XH	2,54mm	20cm

Fonte: Autor

Devido às dificuldades citadas, outro tipo de sensor, com comunicação do tipo UART (*Universal Asynchronous Receiver / Transmitter*), que significa transmissor (RT) /receptor (RX) assíncrono universal e define um protocolo, ou seja, um conjunto de regras para a troca de dados seriais entre dois dispositivos, e com calibração prévia e auto calibração. Alguns sensores foram testados, como os PMS5003<sup>1</sup> e PMS7003<sup>2</sup>, da Plantower e o SPS30<sup>3</sup>, da Sensirion.

Os sensores da Plantower são muito populares, com inúmeros projetos de monitoramento de qualidade do ar de baixo custo, tendo sido implementados e com fácil acesso aos resultados. Ainda continuam com a dificuldade de atingir padrões de excelência dos sensores gravimétricos ou de referência, principalmente para detecção de material particulado PM<sub>10</sub>, e também para funcionamento com ambientes com elevados valores de umidade relativa do ar. O custo médio é em torno de USD 16.00, sem impostos e possui as seguintes características técnicas:

- Fonte de alimentação: 4.5 5.5V;
- Faixa de medição: 0.3-1.0µm, 1.0-2.5µm, 2.5-10 µm;
- Faixa de leitura (PM<sub>2.5</sub> padrão): 0-500µg/m<sup>3</sup>;
- Faixa máxima: 1000µg/m<sup>3</sup>;
- Resolução: 1 µg/m<sup>3</sup>;

<sup>1</sup><https://www.digikey.jp/htmldatasheets/production/2903006/0/0/1/PMS5003-Series-Manual.pdf>

<sup>2</sup><https://www.espruino.com/datasheets/PMS7003.pdf>

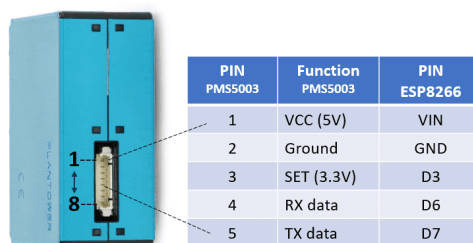
<sup>3</sup><[https://sensirion.com/media/documents/8600FF88/616542B5/Sensirion\\_PM\\_Sensors\\_Datasheet\\_SPS30.pdf](https://sensirion.com/media/documents/8600FF88/616542B5/Sensirion_PM_Sensors_Datasheet_SPS30.pdf)>

- Tempo total de resposta: 10s;
- Corrente ativa:  $\leq 100\text{mA}$ ;
- Corrente de reserva:  $\leq 200\mu\text{A}$ ;
- Temperatura de operação:  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$   $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Faixa de umidade operacional: 0-99%;
- Tamanho: 50 x 38 x 21mm;
- Peso: 42,2g.

Figura A.13: PMS5003, da Plantower, com exemplo de conexão com um NodeMCU ESP8266, podendo ser utilizada a mesma conexão para os modelos citados<sup>1</sup>.



(a) Sensor PMS 5003 da Plantower.



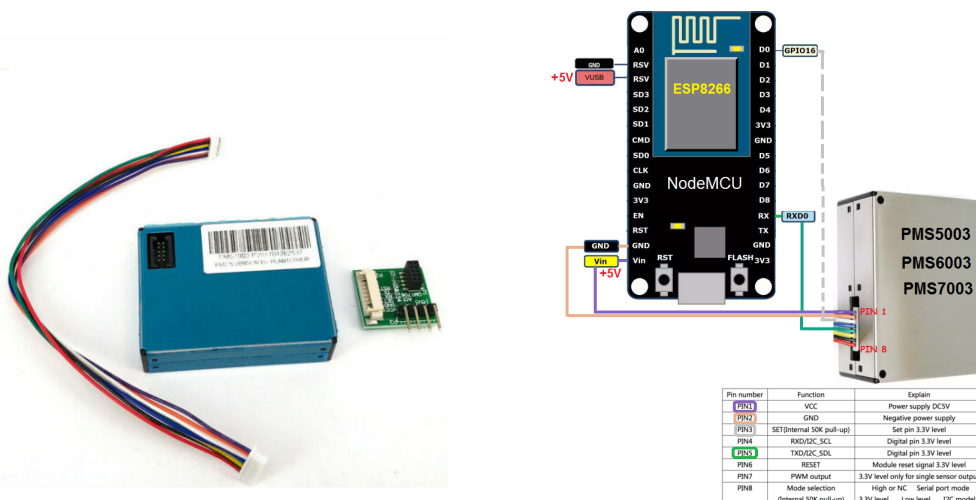
(b) Legenda da pinagem de conexão.

O sensor PMS7003 é bastante similar em relação ao PMS5003, possui as seguintes características técnicas:

- Fonte de alimentação: 4.5  $5.5\text{V}$ ;
- Faixa de medição: 0.3-1.0 $\mu\text{m}$ , 1.0-2.5 $\mu\text{m}$ , 2.5-10 $\mu\text{m}$
- Faixa de leitura (PM<sub>2.5</sub> padrão): 0-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;
- Faixa máxima: 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;
- Resolução: 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;
- Tempo total de resposta: 10 segundos;
- Corrente ativa:  $\leq 100\text{mA}$ ;
- Corrente de reserva:  $\leq 200\mu\text{A}$ ;
- Temperatura de operação:  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$   $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Faixa de umidade operacional: 0-99
- Tamanho: 48 x 37 x 12mm;
- Peso: 27g.

<sup>1</sup><https://www.pieterbrinkman.com/wp-content/uploads/sites/7/2021/02/image-7-768x392.png>

Figura A.14: PMS7003, da Plantower, com exemplo de conexão com um NodeMCU ESP8266 <sup>1</sup>.



(a) Sensor PMS7003 da Plantower.

(b) Legenda da pinagem de conexão.

Ele é um modelo posterior e possui um consumo de energia um pouco menor que seu antecessor, mas com maior diferencial para seu tamanho e peso serem reduzidos, o que pode auxiliar em projetos que necessitem de menor volume. Seu custo se equipara ao do PMS5003, porém necessita de um adaptador para seguir com o mesmo padrão de conector, elevando um pouco o custo, ficando em torno de USD 18, sem impostos. Uma comparação de desempenho pode ser encontrada no website do projeto AQICN<sup>2</sup>. Ambos sensores utilizam o padrão de conector com pitch de 2,54 mm em 6 vias.

O sensor SPS30 da Sensirion é um desempenho superior aos já citados, com um custo também mais elevado, em torno de USD 29, sem impostos. Possui as características técnicas principais:

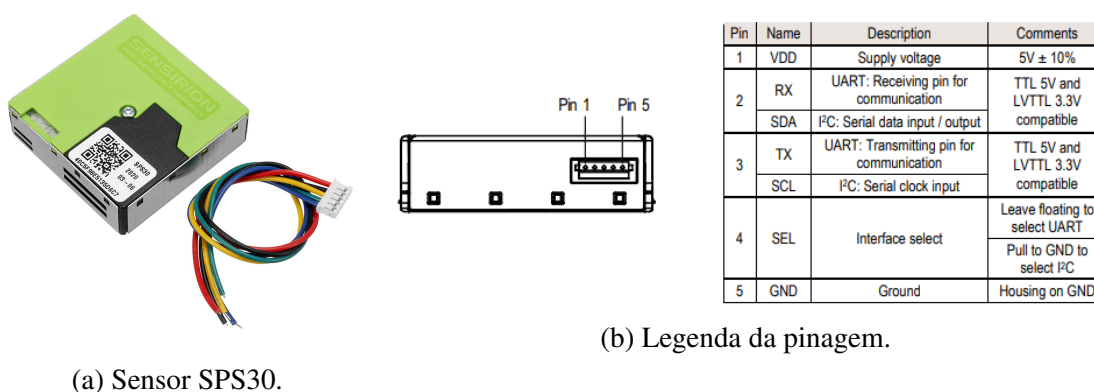
- Fonte de alimentação: 4.5 5.5 V;
- Faixa de medição: PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>4</sub>, PM<sub>10</sub>;
- Faixa de leitura (PM<sub>2,5</sub> padrão): 0-500µg/m<sup>3</sup>;
- Faixa máxima: 1000µg/m<sup>3</sup>;
- Resolução: 1µg/m<sup>3</sup>;
- Tempo total de resposta: 8s;
- Corrente ativa: 60mA;
- Corrente de reserva: ≤ 200µA;

<sup>1</sup><[https://64.media.tumblr.com/d7bf25f0006eb145ec40e2376e4f55d3/tumblr\\_inline\\_olabck7Y6S1tpqui5\\_1280.png](https://64.media.tumblr.com/d7bf25f0006eb145ec40e2376e4f55d3/tumblr_inline_olabck7Y6S1tpqui5_1280.png)>

<sup>2</sup><http://aqicn.org/sensor/pms5003-7003/>

- Temperatura de operação: -10 °C 60°C;
- Faixa de umidade operacional: 0-95%;
- Tamanho: 40,6 x 40,6 x 12,2mm;
- Peso: 26,8g.

Figura A.15: SPS30, da Sensirion na direita e a interface de conexão, possuindo tanto comunicação I<sub>2</sub>C quanto UART<sup>1</sup>



(a) Sensor SPS30.

(b) Legenda da pinagem.

Para o SPS30 temos mais um tipo de conector diferente, agora com pitch de 1,5 mm e 5 vias, que possui capacidade de comunicação de dados através dos protocolos I<sub>2</sub>C e UART. O consumo de energia é menor que os anteriores e possui capacidade de leitura de 4 faixas de tamanho de partículas. Também é o primeiro sensor de baixo custo com certificação internacional mCERTs, específica para PM<sub>2,5</sub>, da certificadora CSA Group, do Reino Unido, que juntamente com a EPA (U.S. Environmental Protection Agency), dos Estados Unidos e TÜV Rheinland, da Alemanha, formam o conjunto de instituições que são reconhecidas pela ANVISA como de excelência. Seus certificados podem ser reconhecidos no Brasil, quando este não possuir certificação específica, como é o caso de monitoramento de material particulado através da técnica NDIR, que não possui norma brasileira, somente para equipamentos com a técnica gravimétrica.

Resultados de testes de correlação do SPS30 com equipamentos de referência realizados pelo centro de pesquisa South coast AQMD, podem ser encontrados em seu website<sup>2</sup>.

<sup>1</sup><https://sensirion.com/media/portfolio/series/image/4df6fc7a-b697-493b-aa0f-f203ba562e11.png>

<sup>1</sup><https://www.csagroup.org/wp-content/uploads/MC-20035001.pdf>

<sup>2</sup><https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/sensirion-sps30-evaluation-kit—field-evaluation.pdf>

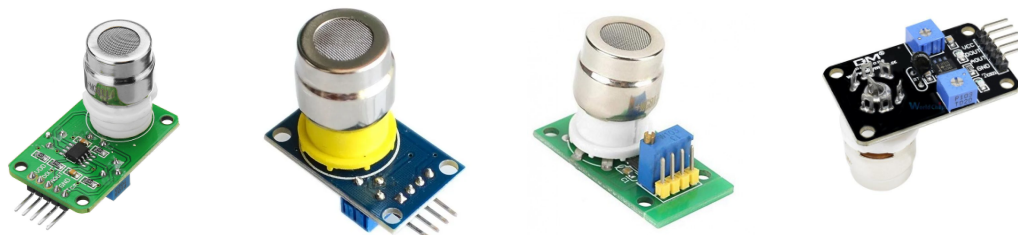
### A.2.3 Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Os sensores de dióxido de carbono encontrados na pesquisa e disponíveis no mercado brasileiro são basicamente de 3 tipos: sensores eletroquímicos, sensores de metal-óxido e sensores óticos. Sensores de dióxido de carbono utilizados em ambiente industrial são os mais difundidos, mas devido seu valor mais elevado (mais de USD 150.00) não foram considerados.

O primeiro sensor considerado para a pesquisa, dentre os estudados, foi o MG811<sup>1</sup> montado sobre um módulo, a fim de facilitar a implementação com o circuito de alimentação e interpretação do sinal analógico já pronto. Seu custo médio é em torno de USD 20.00 com módulo, podendo variar bastante dependendo do fornecedor, sem impostos. Ele é um sensor eletroquímico bastante popular, com diversas empresas comercializando ele sobre seus módulos, como mostra a Figura A.16, que possui as seguintes características técnicas:

- Tensão do aquecedor:  $6,0\text{ V} \pm 0,1\text{V}$ ;
- Tensão do aquecedor:  $6,0\text{ V} \pm 0,1\text{V}$ ;
- Corrente do aquecedor:  $140 \pm 20\text{mA}$ ;
- Consumo do aquecedor:  $850 \pm 120\text{mW}$ ;
- Condições de trabalho padrão:  $-20^{\circ}\text{C}$   $50^{\circ}\text{C}$ , abaixo de 95% (umidade relativa do ar);
- Faixa de medição: 0 a 10.000ppm;
- Dimensões: 40 x 25 x 34mm;
- Peso: 15g.

Figura A.16: Sensor MG811 montado sobre diversos módulos de empresas diferentes e nas imagens da direita os potenciômetros em azul, para a calibração. Fonte: <https://www.google.com/search?q=mg811>, acessado em 23/11/2021



Uma das características já comentadas sobre os sensores analógicos é a neces-

<sup>1</sup><https://sandboxelectronics.com/files/SEN-000007/MG811.pdf>

sidade de uma calibração. Para este sensor os módulos trazem um potenciômetro, uma resistência variável que é utilizada para esta calibração, como mostra a imagem da direita, na Figura A.16. Este tipo de calibração requer os ambientes de extremos, como já comentado no caso dos sensores de material particulado do mesmo tipo, para os pelo menos dois pontos de referência: um de ar puro e outro de ar extremamente poluído. Sensores eletroquímicos necessitam de um período longo de aquecimento em caso de falta de uso, por exemplo, um mês sem uso requer ao menos 48h de funcionamento para que o sensor estabilize suas leituras.

O segundo sensor de dióxido de carbono testado foi o MH-Z14A<sup>1</sup>, da empresa Winsen, da China. É um sensor ótico com uma retangular na entrada da câmara do laser. Seu custo médio é de USD 21.00, sem impostos. As principais características técnicas são:

- Tensão de funcionamento: 4.5 - 5.5V;
- Corrente de trabalho média: < 60mA (pico 150mA);
- Faixa de detecção: 0 - 5000ppm;
- Precisão de detecção:  $\pm 50\text{ppm} + 3\%$  valor da leitura;
- Tempo de aquecimento: 3 min (não considerar leitura; antes desse tempo);
- Protocolos de comunicação:
  - Saída analógica: 0-2.5V;
  - Saída serial (UART);
  - Saída PWM;
- Tempo de resposta:  $T_{90} < 120$  s;
- Temperatura de trabalho: 0°C a 50 °C;
- Umidade: 0 a 95% (umidade relativa do ar);
- Vida útil: 5 anos;
- Tamanho: 57 × 35 × 15 mm;
- Peso: 17g.

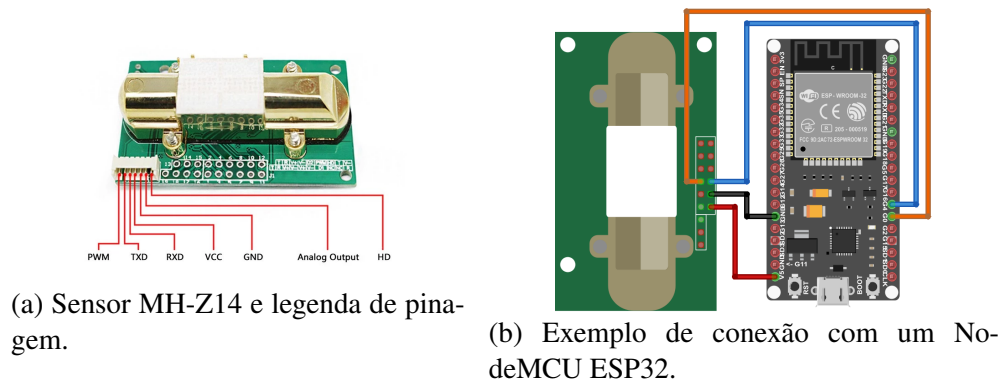
O sensor possui dois tipos de interfaces de pinos, um com uma barra de pinos com pitch de 1,5mm, para cabos com 7 vias, outra para fios que podem ser soldados diretamente na placa (Figura A.17), criando uma opção para escolher qual conector irá

---

<sup>1</sup><https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z14A.pdf>

<sup>1</sup>[https://diyit.com/wp-content/uploads/2021/04/MH-Z14-ESP32-ESP-WROOM-32\\_bb.png](https://diyit.com/wp-content/uploads/2021/04/MH-Z14-ESP32-ESP-WROOM-32_bb.png)

Figura A.17: Sensor MH-Z14A, com possibilidade de conexão através de cabos de 7 vias (pitch de 1,5mm), na imagem da esquerda ou para soldar os fios diretamente no módulo, imagem da direita<sup>1</sup>.



ligado ao microcontrolador. São sensores que fazem uma auto calibração uma vez a cada 24h, assumindo que haverá ao menos uma exposição ao ar puro neste período de pelo menos 1h. Com esse parâmetro coletado durante 1h, assume-se como o ar puro de 400ppm de CO<sub>2</sub> no ar. Caso se deseje fazer uma calibração manual, deve-se manter por pelo menos 20 min o sensor, para então configurar como sendo este o ar puro, de 400 ppm de CO<sub>2</sub>.

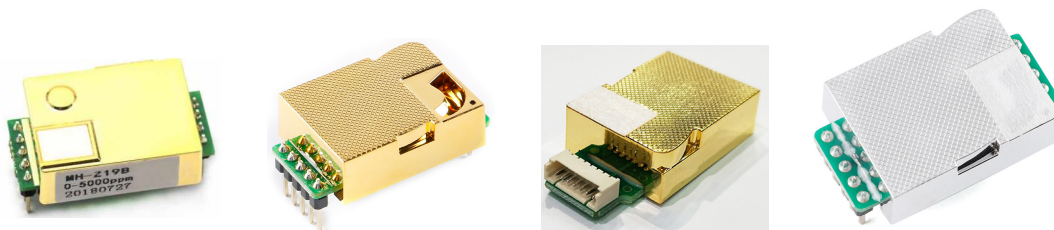
Outro sensor da mesma empresa foi testado, o MH-Z19<sup>2</sup> (é possível encontrar diversas variações, ver Figura A.18), um pouco menor, com duas aberturas de ar ao invés de uma para a coleta de informações do ar. Possui as seguintes especificações técnicas:

- Tensão de funcionamento: 3,6 a 5,5V
- Interface: UART e PWM
- Corrente de trabalho média < 18mA
- Faixa de detecção: 0 - 5000ppm
- Margem de Erro:  $\pm 50\text{ppm} + 3\%$  valor da leitura
- Tempo de aquecimento: 3min (não considerar leitura antes desse tempo)
- Tempo de resposta: < 60s
- Temperatura de trabalho: 0°C a 50°C
- Umidade: 0 a 95% (umidade relativa do ar)
- Dimensões: 39 × 20 × 9mm
- Peso: 6g

O sensor possui variações de interfaces de pinos, que podem ser escolhidas na

<sup>2</sup>[https://www.winsen-sensor.com/d/files/mh-z19c-pins%26terminal-type-co2-manual\(ver1\\_2\).pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/mh-z19c-pins%26terminal-type-co2-manual(ver1_2).pdf)

Figura A.18: Sensor MH-Z19 com diversas variações e formas de conexão, com pinos e cabo de 7 vias. Fonte: <https://www.google.com/search?q=mh-z19>, acessado em 23/11/2021



hora da compra, um com uma barra de pinos com pitch de 1,5mm, para cabos com 7 vias, outra para conexão padrão pitch de 2,54mm, igual ao dos pinos de uma Arduino Uno. Possuem as mesmas características de auto calibração ou de calibração manual, como o modelo anterior.

A empresa possui outros modelos, com características diferentes, como menor peso e baixo consumo de energia. Também possui sensores com maior acurácia, que podem ser utilizados em ambiente industrial.

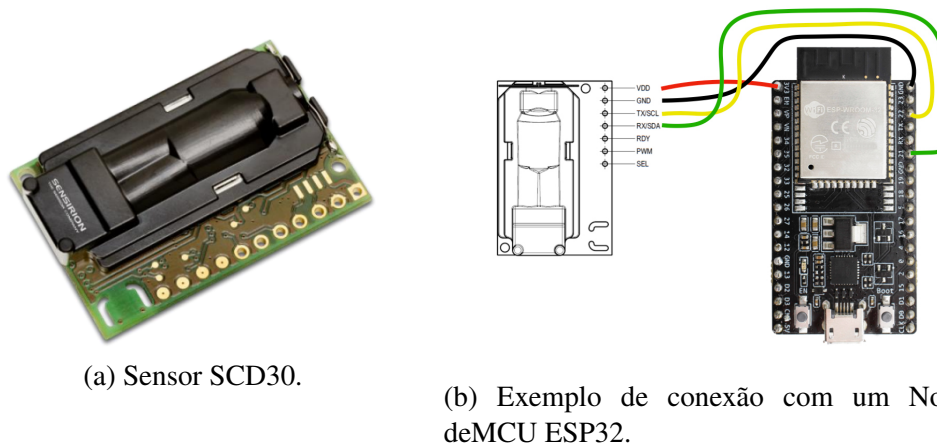
Outro sensor testado foi o SCD30, da empresa Sensirion, que possui um custo um pouco mais elevado do que os demais, em torno de USD 35, mais impostos. Possui as seguintes características técnicas:

- Tensão de alimentação: 3.3 - 5 V;
- Corrente elétrica média: 19 mA;
- Interfaces de comunicação: I<sup>2</sup>C, ModBus, PWM;
- Dimensões: 35 x 23 x 7mm;
- Peso unitário: 18g;
- Sensor de CO<sub>2</sub>:
  - Acurácia: ± 30ppm;
  - Faixa de medição: 400 - 10.000ppm;
  - Tempo de resposta: 20 s;
  - Estabilidade de temperatura: 2.5ppm/°C;
- Sensor de Umidade:
  - Acurácia: 3% de umidade relativa do ar;
  - Faixa de medição: 0 - 95% de umidade relativa do ar;
  - Tempo de resposta: 8 s ;



- Sensor de Temperatura:
  - Acurácia: 0.4°C;
  - Faixa de medição: -40 - 70°C;
  - Tempo de resposta: 10s .

Figura A.19: Sensor SCD30 da Sensirion, que possui integrado ao sensor de CO<sub>2</sub> os sensores de temperatura e umidade. Fonte: Sensirion<sup>1</sup>.



O sensor possui além da medição de dióxido de carbono, sensor integrado de medição de temperatura e de umidade relativa do ar, um combo. A conexão com um microcontrolador é feita através de solda com fios ou barra de pinos com padrão pitch de 2,54mm, em 6 vias. Possui o menor erro de medição anunciado entre os sensores testados e um algoritmo de autocalibração que busca evitar desvios ao longo de sua vida útil, também a mais longa, de 15 anos. Quando medições abaixo de 400ppm são identificadas, aconselha-se a exposição ao ar puro para que a auto calibração seja realizada.

Não foram testados sensores de metal-óxido, como o já citado CCS811, pois eles não realizam a leitura diretamente do dióxido de carbono, mas sim realizando uma estimativa dele com base na leitura de H<sub>2</sub>, medida também conhecida como eCO<sub>2</sub>, ou dióxido de carbono equivalente.

#### A.2.4 Temperatura e Umidade

O maior desafio em termos de hardware foi o sensor de temperatura e umidade relativa do ar. Diversos projetos, artigos, páginas da internet produzem a sensação de que é muito fácil, prático e barato fazer a medição destas variáveis ambientais com sensores

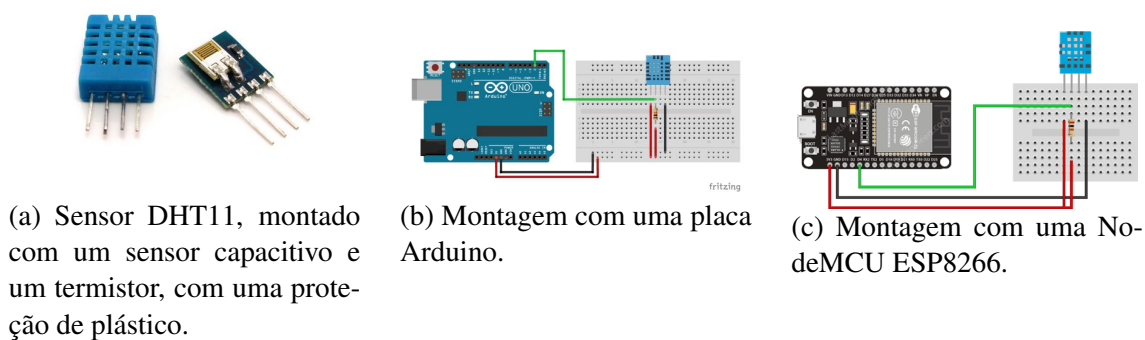
<sup>1</sup><https://developer.sensirion.com/archive/tutorials/create-your-own-co2-monitor/>

de baixo custo. Porém realizar a leitura de forma prática e barata não se mostrou uma tarefa trivial.

O primeiro sensor testado foi um DHT11<sup>1</sup>, que possui um sensor de umidade capacitivo e um termistor para medir o ar circundante, É muito utilizado em projetos com Arduino e possui como características principais as que seguem:

- Fonte de alimentação: 3,5 5V;
- Consumo máximo de corrente: 2,5mA;
- Faixa de medição de umidade relativa (UR): 20 - 80%;
- Precisão na umidade:  $\pm 5\%$  UR (umidade relativa do ar);
- Resolução de umidade: 5% UR;
- Faixa de medição de temperatura: 0 a 50°C;
- Precisão na temperatura:  $\pm 2\%$  °C;
- Resolução na temperatura: 2°C;
- Tempo de resposta: 2s;
- Dimensões: 23 x 12 x 5mm (incluindo terminais).

Figura A.20: Sensor DHT11, montado com um sensor capacitivo e um termistor, com uma proteção de plástico e uma montagem com uma placa Arduino e com uma montagem com uma NodeMCU com ESP8266<sup>2</sup>.



O sensor, apesar de ser bastante popular, possui uma faixa de medição que não permite leituras com valores abaixo de 0 °C, o que torna ele bastante restrito para climas frios, como é o caso da região sul do Brasil e locais com altas altitudes. Possui grande oferta em diversas lojas físicas e virtuais, com preço médio (em 2021) variando em torno de R\$13. Possui conexão através de 4 pinos com pitch de 2,54mm e os dados são enviados

<sup>1</sup>[https://www.filipeflop.com/img/files/download/Datasheet\\_DHT11.pdf](https://www.filipeflop.com/img/files/download/Datasheet_DHT11.pdf)

<sup>2</sup>a) b) <https://www.arduinooeletronica.com.br/produto/sensor-de-umidade-e-temperatura-dht11-2/>, c) <https://lastminuteengineers.com/esp32-dht11-dht22-web-server-tutorial/>

através de um único pino. O sensor possui um controlador de 8 bits que envia os dados no seguinte formato de 5 segmentos:

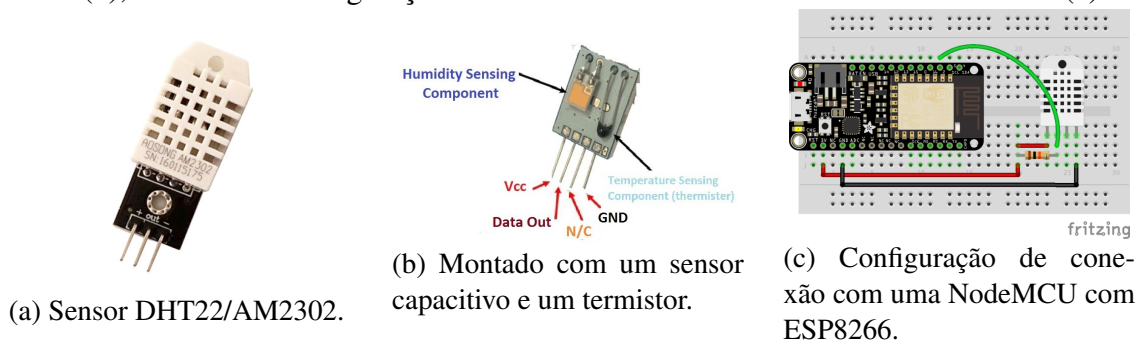
- 8 bit integral UR data +;
- 8 bit decimal UR data +;
- 8 bit integral T data +;
- 8 bit decimal T data +;
- 8 bit check sum = 40 bits.

Como existem bibliotecas prontas para esta leitura, não há um fator de complexidade a ser considerado.

A fim de expandir a faixa de medição possível, foi testado o sensor DHT22 ou AM2302, que é muito semelhante ao DHT11, com algumas características técnicas diferentes, como segue:

- Alimentação: de 3,3 - 5V;
- Consumo máximo de corrente: 0,5mA;
- Faixa de medição de UR: de 0 a 100%;
- Precisão na umidade:  $\pm 2\%$  UR;
- Resolução de umidade: 0,1% UR;
- Faixa de temperatura: -40 - 80°C;
- Precisão na temperatura:  $\pm 1\%$ °C;
- Resolução na temperatura: 0,1°C;
- Tempo de resposta: < 5 segundos;
- Dimensões: 23 x 12 x 5mm (incluindo terminais).

Figura A.21: Sensor DHT22/AM2302(a), montado com um sensor capacitivo e um termistor(b), e com uma configuração de conexão com uma NodeMCU com ESP8266(c) <sup>1</sup>.

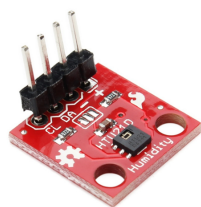


O sensor também é bastante popular, possui uma faixa de medição mais larga e permite leituras com valores abaixo de 0 °C. Possui grande variedade de opções de compra, com preço médio (em 2021) um pouco mais elevado, variando em torno de R\$ 37. Possui o mesmo padrão de conexão e comunicação que o DHT11, com biblioteca própria para implementação. Ambos dois módulos necessitam de um resistor na configuração de leitura dos dados, mas cada fabricante do módulo indica qual resistor deve ser associado na montagem. Alguns módulos, como o vendido pela Sparkfun, já possui um resistor de 4,7 k integrado para a comunicação I<sub>2</sub>C.

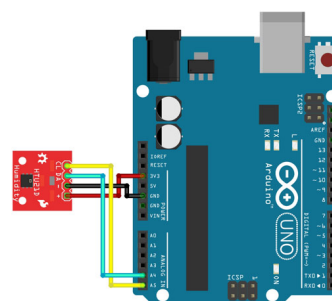
Um pouco mais barato, em torno de R\$28 (em 2021), foi testado o sensor HTU21D/F, da TE Connectivity (Estados Unidos). Ele possui uma maior faixa de leitura, menor consumo de energia e é vendido em módulos com pinagem com pitch de 2,54 mm. Possui como características técnicas principais:

- Fonte de alimentação: 1.5V a 3.6V;
- Corrente de alimentação: máxima de 10mA;
- Faixa de medição da umidade relativa do ar: 0 - 100% UR;
- Faixa de medição de temperatura: -40 - 105°C;
- Protocolo de comunicação: I<sub>2</sub>C;
- Margem de Erro: ±3% UR;
- Tempo de medição: 50 ms;
- Dimensões: 15,8 x 15,6 x 2mm;
- Peso: 1g.

Figura A.22: Sensor HTU21D (esquerda) e uma configuração de conexão com uma placa Arduino Uno (direita).<sup>1</sup>



(a) Módulo com o sensor HTU21D.



(b) Exemplo de configuração de conexão com uma placa Arduino Uno.

<sup>1</sup>a) b) <https://blog.eletrogate.com/sensores-dht11-dht22/>, c) <https://learn.adafruit.com/assets/39485>

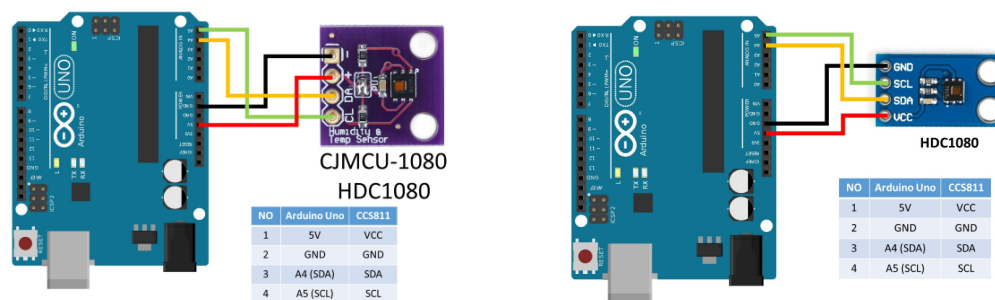
<sup>1</sup><https://electropeak.com/learn/interfacing-htu21d-temperature-humidity-sensor-with-arduino/>

Os módulos sobre os quais são montados podem também necessitar de resistores ou jumpers para a configuração de leitura dos dados, mas cada fabricante do módulo indica qual resistor deve ser associado na montagem ou jumper acionado.

No mesmo estilo de comunicação I<sub>2</sub>C foi testar um sensor mais popular, da Texas Instruments (Estados Unidos), o HDC1080 . Possui as seguintes características técnicas principais:

- Tensão de operação: 2.7 - 5.5V
- Faixa de operação: -40 - 125°C
- Precisão umidade relativa do ar:  $\pm 2\%$
- Precisão temperatura:  $\pm 0.2^\circ\text{C}$
- Resolução de medição de 14 bits
- Interface de comunicação: I<sub>2</sub>C
- Consumo de corrente elétrica: 700nA
- Dimensões: 20 x 11 x 2mm

Figura A.23: Sensor HDC1080, da Texas Instruments, com variações de montagem , em um módulo CJMCMU1080 (a) e um GY-213 HDC1080 (b), ambos conectados a uma placa Arduino UNO<sup>1</sup>.



(a) Sensor HDC1080 em módulo CJMCMU1080, (b) Sensor HDC1080 em um GY-213, conectado a uma placa Arduino UNO.

O sensor é bastante popular e comumente encontrado em módulos com associação com outros sensores, como CCS811, como já comentado, um sensor de TVOC. O valor médio é semelhante aos demais do mesmo tipo, em torno de R\$32 (em 2021). Este sensor possui vasta documentação, o que auxiliou no entendimento do comportamento, bem como manual de aplicação do sensor bastante detalhado<sup>2</sup>.

Já em sensores SMD, foram testados dois modelos, com características um pouco

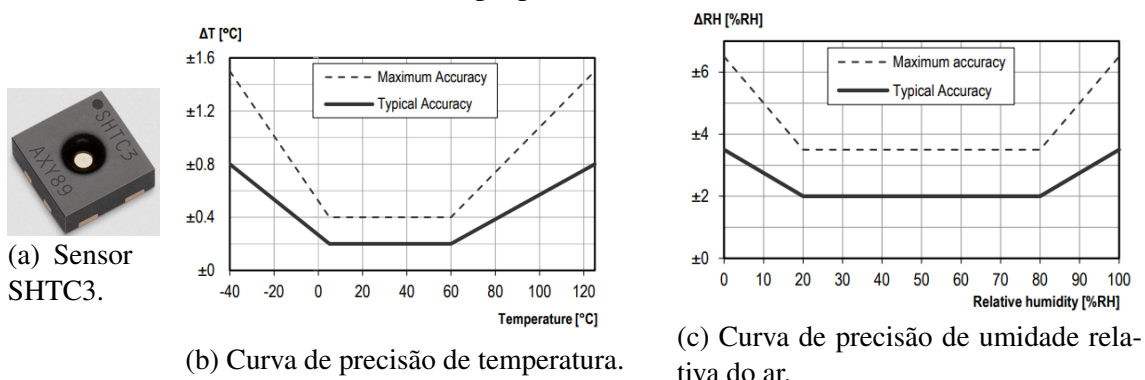
<sup>1</sup><https://innovatorsguru.com/hdc1080-arduino/>

<sup>2</sup><https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf?ts=1654356409436>

diferentes. O SHTC3<sup>1</sup>, da Sensirion (Suíça), possui larga faixa de detecção e ótima precisão na faixa de leitura desejada. Suas principais características são:

- Tensão de alimentação: 1.62 3.6V
- Corrente elétrica operativa: 430  $\mu$ A
- Temperatura operacional: -40 °C +125°C
- Precisão da temperatura total:  $\pm 0.2^\circ\text{C}$
- Faixa de de leitura de UR: 0 100%
- Precisão de leitura de UR:  $\pm 2\%$
- Interface de comunicação: I<sub>2</sub>C
- Resolução: 16 bits
- Peso unitário: 0,35g
- Dimensões: 2 × 2 × 0.75mm

Figura A.24: Sensor SHTC3, da Sensirion (a), possui uma curva de precisão tanto de temperatura (b) quanto de umidade relativa do ar (c) que atendem o propósito de medição de variáveis ambientais, conforme o próprio manual<sup>2</sup>.



Este tipo de sensor deve ser incorporado a um projeto de placa de circuito impresso, uma vez que ele não vem montado sobre um módulo, necessitando de um circuito auxiliar para poder ser implementado. O custo é em torno de USD 2.00 (em 2021), mais impostos, sendo mais caro para uma unidade e mais barato para dezenas ou centenas. Não é possível comparar diretamente o valor com sensores que já vem com o módulo, pois esta montagem irá agregar valor ao sensor. A Sensirion fornece toda a documentação necessária para isso, tanto o desenho em CAD do sensor, quanto às bibliotecas para

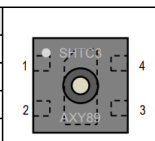
<sup>1</sup><[https://sensirion.com/media/documents/643F9C8E/6164081E/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_SHTC3\\_Datasheet.pdf](https://sensirion.com/media/documents/643F9C8E/6164081E/Sensirion_Humidity_Sensors_SHTC3_Datasheet.pdf)>

<sup>2</sup>[https://sensirion.com/media/documents/643F9C8E/6164081E/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_SHTC3\\_Datasheet.pdf](https://sensirion.com/media/documents/643F9C8E/6164081E/Sensirion_Humidity_Sensors_SHTC3_Datasheet.pdf)

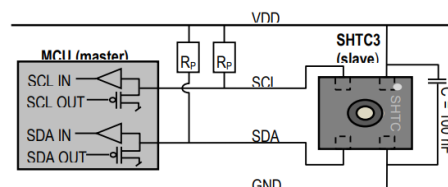
leitura e códigos de exemplo, incluindo para Arduino.

Figura A.25: Vista superior dos pinos de conexão (esquerda) e do circuito para aplicação (direita) do SHTC3, incluindo os elementos necessários como resistores e capacitores, conforme datasheet<sup>1</sup>.

Pin	Name	Comments
1	VDD	Supply voltage
2	SCL	Serial clock, bidirectional
3	SDA	Serial data, bidirectional
4	VSS	Ground



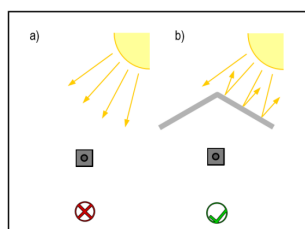
(a) Sensor HDC1080 em módulo CJMCU1080, integrado com Arduino UNO.



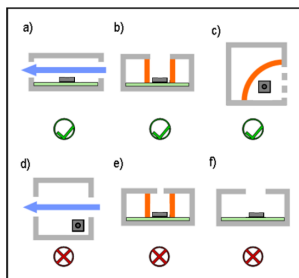
(b) Sensor HDC1080 em um GY-213, conectado a uma placa Arduino UNO.

Assim como a Texas Instruments, a Sensirion possui um interessante guia de projeto de aplicação de sensores, especificamente o de temperatura e umidade (Fonte: Design Guide V1, já citado), detalha a forma mais eficiente para este tipo de medição. Seguir orientações, como mostra a Figura A.26c, auxilia na tarefa de informações mais precisas serem extraídas dos sensores.

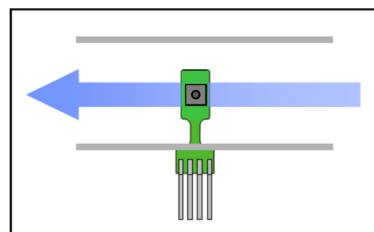
Figura A.26: Considerações que devem ser observadas no projeto do monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar, como não expor a radiação solar direta ao sensor (a), projetar uma condição de fluxo de ar constante no sensor (Figuras (b) e (c)), conforme o guia de projeto. Fonte: Design Guide V1, já citado.



(a) Não expor o sensor a radiação solar.



(b) Atentar para bloqueio de fluxo de ar.



(c) Garantir fluxo constante de ar.

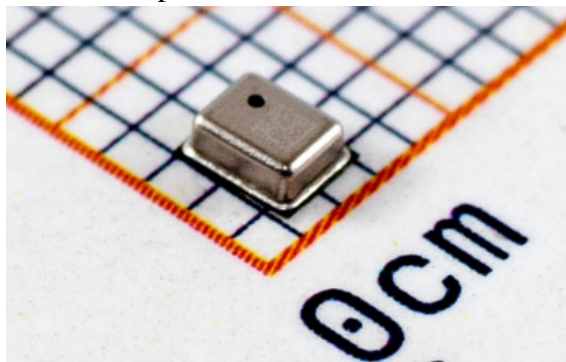
O fluxo de ar deve ser constante sobre o sensor e passar diretamente sobre ele, fazendo com que as condições locais no sensor se equilibrem rapidamente com as condições ambientais. Paredes, obstáculos para o fluxo de ar que passará pelo sensor, devem ser cuidadosamente analisados no projeto, a fim de não termos um volume de ar “preso” sobre o sensor, perdendo a informação desejada que é a do meio ambiente.

Com o interesse de termos juntamente com umidade e temperatura a pressão at-

<sup>1</sup><[https://sensirion.com/media/documents/FC5BED84/61644655/Sensirion\\_Temperature\\_Sensors\\_Design\\_Guide\\_V1.pdf](https://sensirion.com/media/documents/FC5BED84/61644655/Sensirion_Temperature_Sensors_Design_Guide_V1.pdf)>

mosférica, foi testado outro sensor, o SPL06-001<sup>1</sup>, da Goertek (China), mes configuração de montagem SMD (ver Figura A.27. É um sensor com interface I<sub>2</sub>C, que poderia auxiliar na compreensão das variações de outros sensores, como o de material particulado e dióxido de carbono. Possui uma faixa de leitura de pressão atmosférica entre 300 e 1100 hPa (ou +9000m e -500m em relação ao nível do mar). A alimentação de energia é entre 1.7 e 3.6V e seu consumo é 60μA.

Figura A.27: Sensor de pressão atmosférica SPL06-001, da Goertek.



Fonte: Goertek.

---

<sup>1</sup>[https://datasheet.lscs.com/szlcsc/2101201914\\_Goertek-SPL06-001\\_C2684428.pdf](https://datasheet.lscs.com/szlcsc/2101201914_Goertek-SPL06-001_C2684428.pdf)



### A.3 Caixa de condicionamento

O acondicionamento de um equipamento para medição de poluentes ou variáveis ambientais deve ser bastante estudado antes de se implementar uma solução definitiva, tendo em mente características que devem tentar ser atendidas da melhor forma possível:

- Material adequado em relação a durabilidade;
- Exposição a intempéries;
- Capacidade de confeccionar (de forma própria ou por terceiros);
- Atendimento aos requisitos de cada sensor para a correta leitura das variáveis desejadas;
- Forma de fixação ou carregamento (se for vestível);
- Custo benefício;
- Praticidade de montar e de manutenção;
- Praticidade em comunicação, tanto por cabo (firmware) ou sem fio.

Nas primeiras tentativas, atendendo ao custo benefício frente a necessária curva de aprendizagem, foram utilizadas caixas de passagem de energia elétrica, muito comuns no mercado e em diversos tipos e formatos.

Figura A.28: Caixas de passagem elétrica encontradas no mercado e que foram inicialmente utilizadas para o acondicionamento. Fonte: [www.google.com/search?q=caixa+de+passagem](http://www.google.com/search?q=caixa+de+passagem).



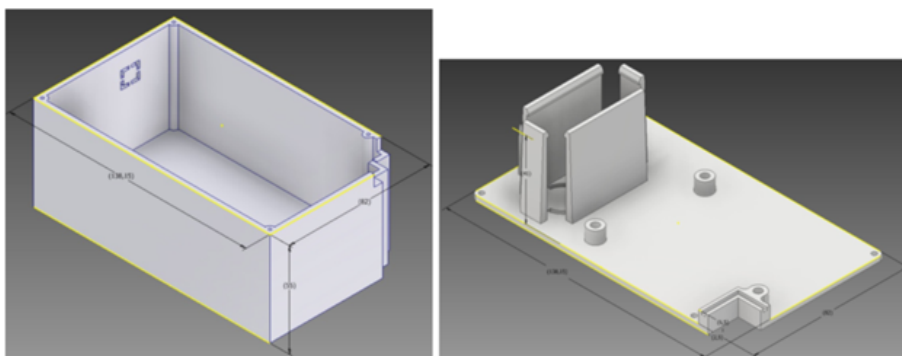
Os valores destas caixas variam bastante, entre R\$30 e R\$80, conforme fabricante e modelo. Uma das necessidades ao utilizar este tipo de solução é a perfuração da caixa para aberturas de acondicionamento de sensores e cabeamento, o que pode gerar alguma dificuldade, bem como a fixação, que normalmente é pensada pelos fabricantes como definitiva. As primeiras montagens possuem as características como pode ser visto na Figura A.8.

Nas Figura A.29 podem ser observados os estudos realizados com o auxílio de ferramentas de desenho tridimensional e de renderização, que auxiliaram na redução de

custos com a visualização antecipação de sólidos muito realísticos do que deveriam se tornar os projetos, antes de se gastar recursos com a confecção física dos mesmos.

Após os testes iniciais e as definições da placa de integração, ver Figura A.29, a possibilidade de se desenhar uma caixa de acondicionamento dedicada ao projeto pode ser executada, de forma a tentar prever as variantes analisadas nos testes que podem afetar o funcionamento.

Figura A.29: Desenho prévio para confecção caixa de acondicionamento, base e tampa. Autor: Autor.

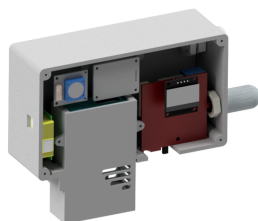


Na Figura A.30 podem ser vistos os estudos possíveis e que foram executados para simular opções de características e variações da caixa de acondicionamento e outros itens do projeto. Foram simuladas variações com display de visualização de dados incorporadora e sem, com e sem duto de fluxo de ar, a fim de se adicionar um aquecimento do ar na entrada, com sensores de fabricantes diferentes e modelos diferentes e do posicionamento das caixas em infraestruturas simuladas, como paredes e colunas.

Figura A.30: Estudo pré-confecção da caixa de acondicionamento com o auxílio de renderização, a fim de se obter mais informações através da percepção visual do equipamento final. Opções de fixação em paredes ou colunas (a). Opções com e sem o duto de circulação de ar (c) e (d). Opções com display (todas), para visualização de informações diretamente na caixa.



(a) Estudo de fixação.



(b) Renderização para análise.



(c) Com duto de ar.



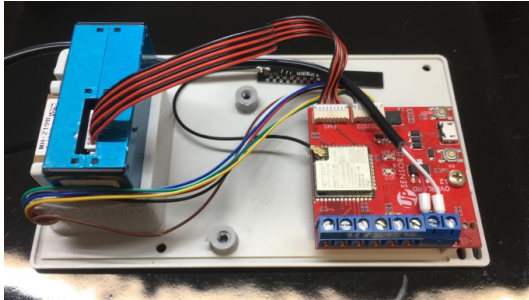
(d) Sem duto de ar.

Fonte: Autor.

Na Figura A.31 os as caixas que foram confeccionadas pela empresa Eplax Solu-

ções e Tecnologia<sup>1</sup> que usaram técnicas de confecção de baixo volume de unidades com colagem de elementos, aparafusamento, dobragem de plástico e usinagem das peças. Esse tipo de serviço permite uma maior precisão dos engates e rigidez do material.

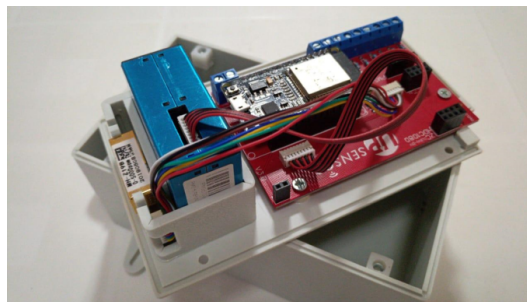
Figura A.31: Montagens de sensores, placa, cabos de conexões entre sensores e placa e entre as partes da caixa, tampa e fundo.



(a) Fixação da penúltima versão de placa de aquisição de dados na caixa confeccionada pela Eplax.



(b) Fixação através de pressão, sem o uso de parafusos. Dourado é o sensor MH-Z19 e azul o PMS5003.



(c) Visão geral da montagem com NodeMCU, semelhante a versão a ser realizada com impressão 3D.

Fonte: Autor.

Alguns pontos são importantes de serem salientados quanto a caixa de acondicionamento e que podem impactar no processo de replicar o projeto:

- Para cada lote de caixas que serão encomendadas com uma empresa terceirizada, deve considerar que além das caixas, deve-se pagar o projeto de fabricação da caixa, que é necessário para que o projeto idealizado seja exequível pelos processos de produção da empresa;
- Pequenas quantidades de caixas podem tornar inviável o custo, pois todo o custo do projeto de adaptação para fabricação tem que ser diluído pelo número de caixas a serem produzidos, quanto maior o número de caixas, mais baratas elas ficarão individualmente;
- O tempo de execução dos serviços terceirizados é muito diferente de se executar

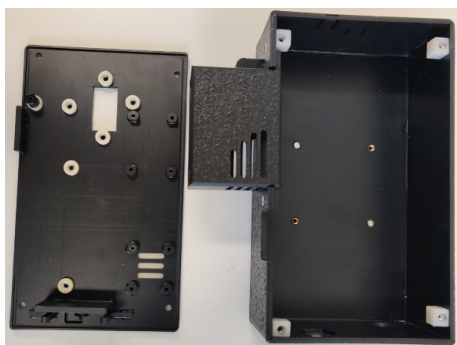
<sup>1</sup><https://eplax.com.br/>

diretamente na impressora 3D do laboratório, as vezes pode-se ficar semanas na fila para a análise do projeto e mais algumas entre a aprovação do projeto e a entrega do lote de caixas;

- Deve-se considerar ainda o tempo entre o lote a ser fabricado e a amostra a ser aprovada, que normalmente é enviada por algum transporte mais econômico, como os Correios, e são mais algumas semanas a se considerar de tempo no cronograma do projeto;
- Cada sensor possui características de funcionamento, alguns de gases podem ser sensíveis a materiais utilizados na caixa, como os resíduos voláteis do próprio material ou colas que podem ter sido utilizadas, o que pode afetar a leitura dos dados dos sensores.

Na Figura A.32 os as caixas que foram confeccionadas pela empresa Eplax, já com atualizações para a versão final deste projeto.

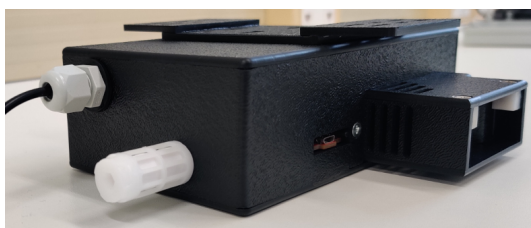
Figura A.32: Nova versão de caixa, agora com as correções para a versão final, sendo que foi projetada de forma modular, podendo ter ou não alguns elementos, como duto externo para fixação futura de aquecimento do ar, placa para fixação por parafuso na parede e esta por encaixe na caixa e suportes para diferentes modelos de sensores, como PMS5003, PMS7003 ou SPS30.



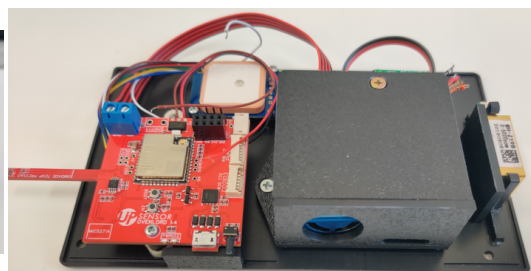
(a) Tampa e fundo com porcas fixadas por cola na caixa.



(b) Placa para fixação permanente na parede e engate na caixa e duto de ar para aquecimento embaixo.



(c) Visão do dutos de ar, fixação do cabo de energia e proteção do sensor de umidade e temperatura.



(d) Visão aberta com a opção de inserção de módulo de GPS (quadrado branco acima na esquerda).

Fonte: Pedro Souza.

## APÊNDICE B — HARDWARE COM FABRICAÇÃO EM LABORATÓRIO

Os trabalhos prévios desenvolvidos mostraram que o uso de sensores requer qualidade na fabricação do sistema de aquisição, bem como técnicas físicas para isolamento do ambiente que se deseja mensurar. Não deve-se permitir grande influência de corpos ou materiais próximos, ou mesmo do próprio equipamento de medição.

Inicialmente foram utilizadas placas de aquisição de dados Arduino Uno e diversos elementos, como será mostrado no capítulo de Resultados. Para a parte de comunicação foram utilizados módulos de comunicação do tipo ESP-01, depois passando para ESP8266 em um módulo NodeMCU e posteriormente um módulo ESP32, embarcado em uma placa de circuito impresso.

Após o desenvolvimento do hardware com suporte de serviços de terceiros, foram elencados os itens de hardware que seriam possíveis de serem confeccionados com o auxílio de laboratórios de escolas, universidades ou espaços maker. Porém, o mais importante foi salientar o que seria muito difícil de ser executado de forma autoral, sendo este itens os destacados:

- i Sensoriamento de temperatura e umidade sem o uso de um módulo ou sensor já encapsulado;
- ii Microcontrolador sem o uso de um "NodeMCU", soldado diretamente na pcb;
- iii Fixação de sensores sem o uso de parafuso ou ou elementos do tipo, sendo difícil uma impressão 3D obter a rigidez necessária para a fixação por pressão de hastes;

A placa de circuito impresso teve pequenas modificações para o uso de elementos do tipo pth, conforme mostra a Figura B.1. É possível a conexão direta com módulos como os das Figuras A.22 ou A.23, além do uso de outras montagem desse tipo de sensor, como os sensores encapsulados SHT20, SHT30 e outros similares<sup>1</sup>, ver Figura B.2.

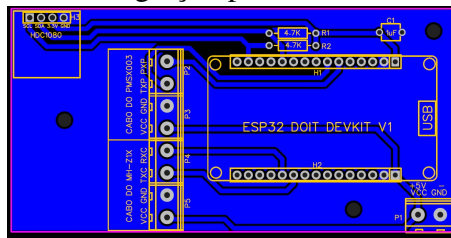
Para o sensoriamento de temperatura e umidade a solução encontrada pode fazer uso dos prensa cabos para a fixação do cabo, como se verá na Figura B.8, e a fixação através de bornes com o uso de uma chave de fenda ou cruz.

A caixa de condicionamento não sofreu muitas alterações, sendo que as maiores dificuldades se encontraram na precisão para o fechamento e alinhamento de tampas e engates plástico-plástico, devido a própria natureza das impressores de filamento de

---

<sup>1</sup><https://pt.aliexpress.com/item/4000921395488.html>

Figura B.1: Placa de integração para uso com NodeMCU ESP32.



Fonte: Gustavo Selbach.

Figura B.2: Diversos sensores da Sensirion, encapsulados para uso em solo ou expostos, ideal para que o fluxo de ar contínuo sobre o sensor seja atendidos.

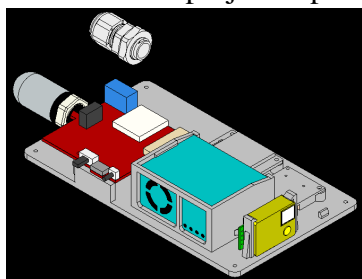


baixo custo. A primeira etapa foi desenhar a caixa para atender as características de uma impressora 3D e as demandas do projeto, ver Figura B.3.

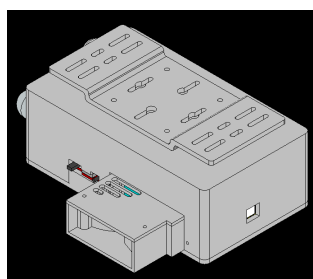
Após os testes iniciais e as definições da placa de integração, ver Figura B.3, a possibilidade de se desenhar uma caixa de acondicionamento dedicada ao projeto pode ser executada, de forma a tentar prever a maioria das variante que podem afetar o funcionamento.

Um exemplo de impressão da caixa de acondicionamento pode ser visto na Figura B.4, onde a caixa foi impressa em duas metades, que se encaixam de forma a acondicionar todos os elementos, de forma semelhante ao que foi utilizado nas caixas fabricadas por terceiros, inclusive com os engates rápidos.

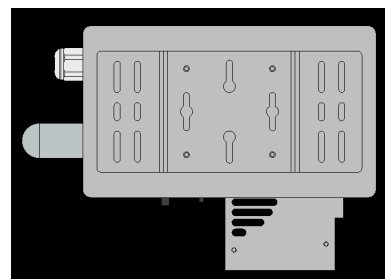
Figura B.3: Projeto de caixa de acondicionamento. As imagens mostram como foi feito o estudo para a disposição dos elementos, peças de fixação e cabeamento a fim de atender as demandas do projeto específico.



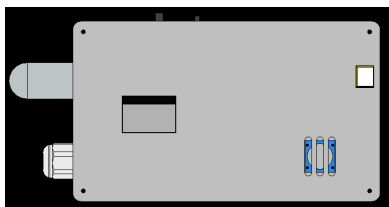
(a) Estudo da disposição dos elementos.



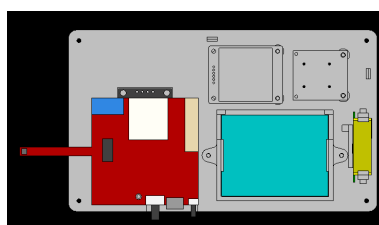
(b) Estudo das áreas livres para sensores.



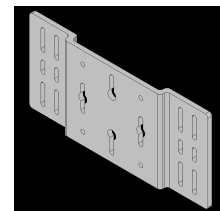
(c) Estudo das áreas livres para sensores.



(d) Estudo das áreas livres para sensores.



(e) Estudo da fixação.



(f) Estudo da fixação.

Fonte: Pedro Souza.



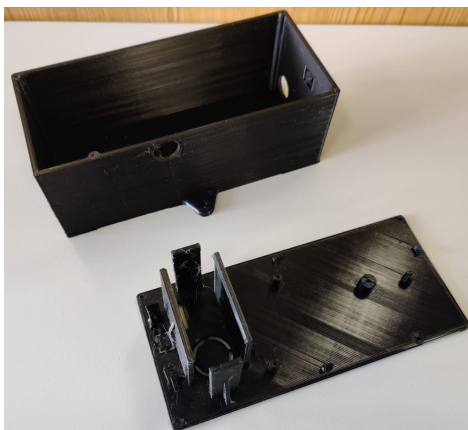
Figura B.4: Uso de impressão 3D para a confecção da caixa de acondicionamento. Figuras (a) e (b) com imagens de caixas montadas e Figuras (c) e (d) com as partes impressas inferior e superior separadas. Pode-se notar que os engates rápidos para os sensores foram mantidos, bem como o destaques rápidos para os sensores também.



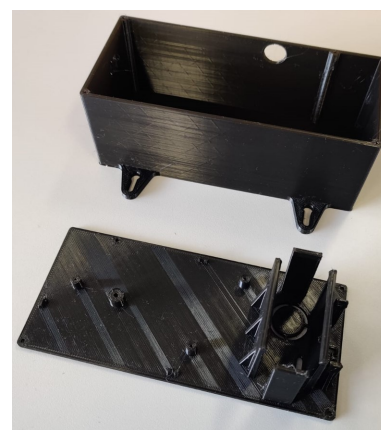
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Pedro Souza.

## B.1 ENERGIA

A fonte de energia para o equipamento foi sendo alterada à medida que foi sendo alterada a placa de circuito impresso. A primeira versão da placa, com a utilização de uma Arduino Uno, era alimentada através de um cabo com conector USB-B para a placa e USB-A (tradicional) para a extremidade da fonte de energia, ver Figura B.5.

Figura B.5: Cabo de alimentação e programação para a placa Arduino Uno, na esquerda a ponteira com conector USB-A e na direita a ponteira com conector USB-B.



Fonte: Autor.

O cabo é utilizado tanto para a programação do microcontrolador quanto para a energização do sistema, durante a programação a própria USB do computador alimenta o sistema e para a instalação nos ambientes uma fonte de alimentação de celular poderia ser escolhida, atentando para os valores de tensão e corrente elétrica serem atendidos. Para os testes foi utilizada uma fonte de alimentação de corrente contínua com 9V e 1A, com um plug P4 macho 5,5 x 2,1mm. Preço médio da fonte é de R\$20 (em 2021), podendo variar conforme fornecedor e características elétricas, ver Figura B.6<sup>1</sup>.

Figura B.6: Fonte de alimentação para Arduino UNO, com plug P4 compatível.



Fonte: Autor.

---

<sup>1</sup><https://www.filipeflop.com/produto/fonte-dc-chaveada-9v-1a-plug-p4/>

Da mesma forma que utilizado para a alimentação da Arduino UNO, a fonte a ser escolhida deveria atender aos requisitos de tensão elétrica e corrente elétrica do sistema. Com a adição da base do NodeMCU, foi acrescida a possibilidade de uma alimentação dedicada, assim como na Arduino, com o plug P4.

A utilização da fonte de alimentação dedicada se manteve no projeto de placa confeccionada e para facilitar a conexão, foi utilizado um plug P4 fema para ser fixado na caixa do sistema através de rosca e então o plug ficaria exposto do lado externo da caixa. O custo médio deste componente é bastante heterogêneo, variando entre R\$3 e R\$20 (em 2021). foram testados diversos modelos (Figura B.7 e a qualidade afetou muito o sucesso no fornecimento de energia quando pequenas movimentações faziam com que houve perda de contato efetivo e o sistema desligava.

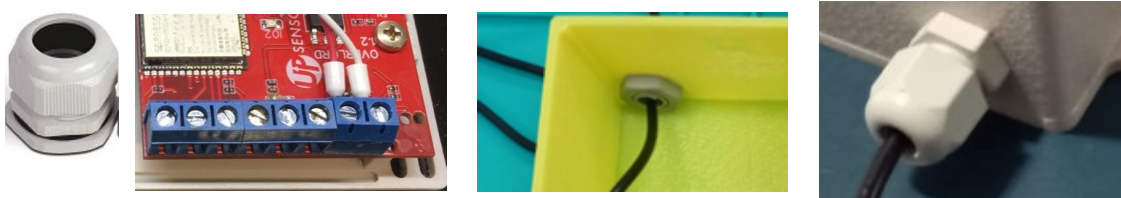
Figura B.7: Plug P4 fema, para fixação interna na caixa e encaixe externo para a fonte de energia.



Fonte: Autor.

Esta solução não se mostrou muito eficiente e outra solução foi testada para as placas de circuito impresso, a fixação da fonte diretamente em um barramento de pinos.

Figura B.8: Peça do prensa cabo (a), fixação do cabo de alimentação em barra de pinos da placa, através de parafuso (b), fixação do prensa cabo pelo lado interno (c) e lado externo (d) para a fixação do cabo na caixa, sem o risco de ao puxar ser desconectado da placa.

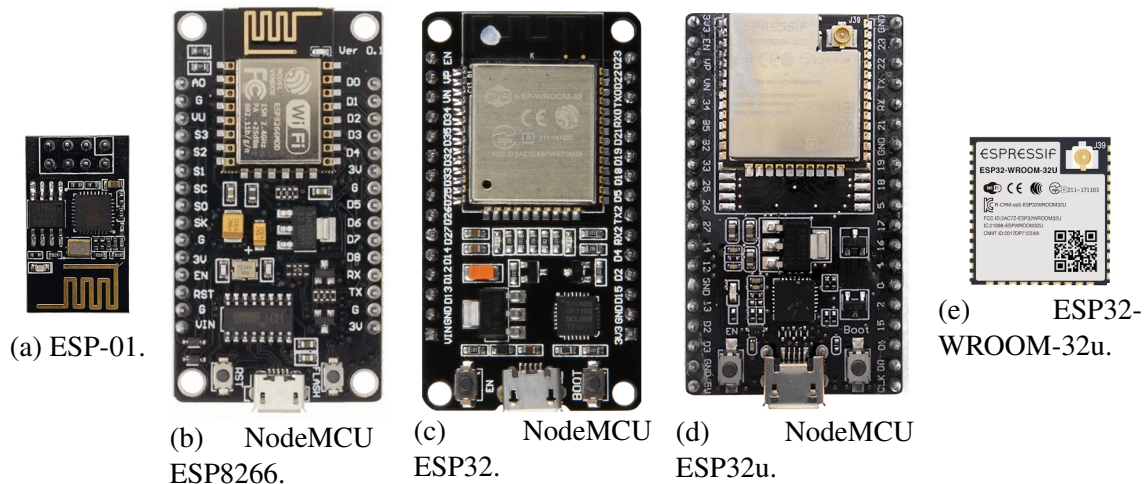


Com a utilização do prensa cabo e a fixação do cabo de alimentação em barra de pinos da placa, o cabo não soltou mais com pequenas trações, como ocorria antes e o fornecimento de energia para a placa não teve mais problemas. A solução é de simples implementação sendo suficiente um orifício de tamanho adequado com o fio e a armadura do prensa-cabo, ver Figura B.8.

## B.2 COMUNICAÇÃO

A comunicação sem fio sempre ocorreu, desde a primeira versão, com o uso dos módulos de comunicação da Expressif, começando com os módulos simples, como ESP-01, passando pelos NodeMCU ESP8266, NodeMCU ESP32 e ESP32-WROOM-32u (integrada na placa), ver Figura B.9.

Figura B.9: Antenas de comunicação com módulos simples, como ESP-01 (a), passando pelos NodeMCU ESP8266 (b), NodeMCU ESP32 (c) NodeMCU ESP32u (d) e ESP32-WROOM-32u (a ser integrada na placa).



A utilização dos módulos como o ESP-01 é bastante comum com placas Arduino, porém a necessidade de que se fazer um divisor de tensão para que o nível de 3.3V da ESP-01 seja compatível com o de 5V.

Como já comentado no item A.1 a introdução do NodeMCU acaba com este problema, unindo a antena de comunicação com o microcontrolador.

Como pode-se observar nas Figuras B.9a e B.9b, as antenas são impressas na própria placa (linha sinuosa dourada). É um método de confecção de antenas embarcadas, porém podem não ser muito eficientes, o que causa perda de conectividade quando o sinal de Wi-Fi não for potente. Para solucionar esta questão é possível substituir os módulos que permitem a implementação de uma antenas externas de diversos tipos, através de um conector do tipo IPEX, como pode ser visto em exemplos na Figura B.10.

Figura B.10: Tipos de antena de comunicação não impressas na ESP32 podem ser adicionadas para melhorar a comunicação Wi-Fi com a internet. Antenas do tipo fita (a), sólidas (b) e com uma montagem em uma caixa (c).



Fonte: Autor.

### **B.3 SOFTWARE**

## APÊNDICE C — DEFINIÇÕES ANVISA

Em sua Resolução-re Nº 09, De 16 De Janeiro De 2003 , a ANVISA “considerando a preocupação com a saúde, a segurança, o bem-estar e o conforto dos ocupantes dos ambientes climatizados;” recomenda os seguintes Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior (ver compilação no I) em ambientes climatizados de uso público e coletivo. Alguns destaques compilados:

- O Valor Máximo Recomendável - VMR, para contaminação microbiológica deve ser =  $750 \text{ ufc/m}^3$  de fungos, para a relação I/E = 1,5, onde I é a quantidade de fungos no ambiente interior e E é a quantidade de fungos no ambiente exterior.
  - Quando o VMR for ultrapassado ou a relação I/E for  $> 1,5$ , é necessário fazer um diagnóstico de fontes poluentes para uma intervenção corretiva.
  - É inaceitável a presença de fungos patogênicos e toxigênicos.
- Os Valores Máximos Recomendáveis para contaminação química são:
  - = 1000 ppm de dióxido de carbono - ( $\text{CO}_2$ ) , como indicador de renovação de ar externo, recomendado para conforto e bem-estar (Standard 1997);
  - = 80  $\text{CO}_2$  de aerodispersóides totais no ar, como indicador do grau de pureza do ar e limpeza do ambiente climatizado; NOTA: Pela falta de dados epidemiológicos brasileiros é mantida a recomendação como indicador de renovação do ar o valor = 1000 ppm de Dióxido de carbono -  $\text{CO}_2$ .
- Os valores recomendáveis para os parâmetros físicos de temperatura, umidade, velocidade e taxa de renovação do ar e de grau de pureza do ar, deverão estar de acordo com a NBR 6401 - Instalações Centrais de Ar Condicionado para Conforto - Parâmetros Básicos de Projeto da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (Técnicas and no Brasil 1993)
  - A faixa recomendável de operação das Temperaturas de Bulbo Seco, nas condições internas para verão, deverá variar de  $23^\circ\text{C}$  a  $26^\circ\text{C}$ , com exceção de ambientes de arte que deverão operar entre  $21^\circ\text{C}$  e  $23^\circ\text{C}$ . A faixa máxima de operação deverá variar de  $26,5^\circ\text{C}$  a  $27^\circ\text{C}$ , com exceção das áreas de acesso que poderão operar até  $28^\circ\text{C}$ . A seleção da faixa depende da finalidade e do local da instalação. Para condições internas para inverno, a faixa recomendável de operação deverá variar de  $20^\circ\text{C}$  a  $22^\circ\text{C}$ .

- A faixa recomendável de operação da Umidade Relativa, nas condições internas para verão, deverá variar de 40% a 65%, com exceção de ambientes de arte que deverão operar entre 40% e 55% durante todo o ano. O valor máximo de operação deverá ser de 65%, com exceção das áreas de acesso que poderão operar até 70%. A seleção da faixa depende da finalidade e do local da instalação. Para condições internas para inverno, a faixa recomendável de operação deverá variar de 35% a 65%. No mesmo Anexo D apresenta o Quadro I, com as destaques para possíveis fontes de poluentes biológicos.
- Aerodispersóides: sistema disperso, em um meio gasoso, composto de partículas sólidas e/ou líquidas. O mesmo que aerosol ou aerossol.
- ambiente aceitável: ambientes livres de contaminantes em concentrações potencialmente perigosas à saúde dos ocupantes ou que apresentem um mínimo de 80% dos ocupantes destes ambientes sem queixas ou sintomatologia de desconforto (Standard 1997)
- ambientes climatizados: são os espaços fisicamente determinados e caracterizados por dimensões e instalações próprias, submetidos ao processo de climatização, através de equipamentos.
- ambiente de uso público e coletivo: espaço fisicamente determinado e aberto a utilização de muitas pessoas.
- ar condicionado: é o processo de tratamento do ar, destinado a manter os requerimentos de Qualidade do Ar Interior do espaço condicionado, controlando variáveis como a temperatura, umidade, velocidade, material particulado, partículas biológicas e teor de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
- Padrão Referencial de Qualidade do Ar Interior: marcador qualitativo e quantitativo de qualidade do ar ambiental interior, utilizado como sentinela para determinar a necessidade da busca das fontes poluentes ou das intervenções ambientais.
- Qualidade do Ar Ambiental Interior: Condição do ar ambiental de interior, resultante do processo de ocupação de um ambiente fechado com ou sem climatização artificial.
- Valor Máximo Recomendável: Valor limite recomendável que separa as condições de ausência e de presença do risco de agressão à saúde humana.



## APÊNDICE D — DEFINIÇÕES ANVISA, ORIENTAÇÃO TÉCNICA

ORIENTAÇÃO TÉCNICA ELABORADA POR GRUPO TÉCNICO ASSESSOR SOBRE PADRÕES REFERENCIAIS DE QUALIDADE DO AR INTERIOR EM AMBIENTES CLIMATIZADOS ARTIFICIALMENTE DE USO PÚBLICO E COLETIVO

Tabela D.1: QUADRO I - POSSÍVEIS FONTES DE POLUENTES BIOLÓGICOS

<b>Agentes biológicos</b>	<b>Principais fontes em ambientes interiores</b>	<b>Principais Medidas de correção em ambientes interiores</b>
Agentes biológicos	Principais fontes em ambientes interiores	Principais Medidas de correção em ambientes interiores
Bactérias	Reservatórios com água estagnada, torres de resfriamento, bandejas de condensado, desumidificadores, umidificadores, serpentinas de condicionadores de ar e superfícies úmidas e quentes	Realizar a limpeza e a conservação das torres de resfriamento; higienizar os reservatórios e bandejas de condensado ou manter tratamento contínuo para eliminar as fontes; eliminar as infiltrações; higienizar as superfícies
Fungos	Ambientes úmidos e demais fontes de multiplicação fúngica, como materiais porosos orgânicos úmidos, forros, paredes e isolamentos úmidos; ar externo, interior de condicionadores e dutos sem manutenção, vasos de terra com plantas	Corrigir a umidade ambiental; manter sob controle rígido vazamentos, infiltrações e condensação de água; higienizar os ambientes e componentes do sistema de climatização ou manter tratamento contínuo porosos contaminados; eliminar ou restringir vasos de plantas com cultivo em terra, ou substituir pelo cultivo em água (hidroponia); utilizar filtros G-1 na renovação do ar externo
Protozoários	Reservatórios de água contaminada, bandejas e umidificadores de condicionadores sem manutenção	Higienizar o reservatório ou manter tratamento contínuo para eliminar as fontes

*Continua na próxima página*

Tabela D.1 – *Continuação da página anterior*

<b>Agentes biológicos</b>	<b>Principais fontes em ambientes interiores</b>	<b>Principais Medidas de correção em ambientes interiores</b>
Vírus	Hospedeiro humano	Adequar o número de ocupantes por m <sup>2</sup> de área com aumento da renovação de ar; evitar a presença de pessoas infectadas nos ambientes climatizados
Algas	Torres de resfriamento e bandejas de condensado	Higienizar os reservatórios e bandejas de condensado ou manter tratamento contínuo para eliminar as fontes
Pólen	Ar externo	Manter filtragem de acordo com NBR-6401 da ABNT
Artrópodes	Poeira caseira	Higienizar as superfícies fixas e mobiliário, especialmente os revestidos com tecidos e tapetes; restringir ou eliminar o uso desses revestimentos
Animais	Roedores, morcegos e aves	Restringir o acesso, controlar os roedores, os morcegos, ninhos de aves e respectivos excrementos

Fonte: Autor, adaptado de ANVISA.

Já o Quadro II, traz a relação dos poluentes de origem química em ambientes internos.

Tabela D.2: QUADRO II - POSSÍVEIS FONTES DE POLUENTES QUÍMICOS

<b>Agentes químicos</b>	<b>Principais fontes em ambientes interiores</b>	<b>Principais Medidas de correção em ambientes interiores</b>
Agentes químicos	Principais fontes em ambientes interiores	Principais Medidas de correção em ambientes interiores

*Continua na próxima página*

Tabela D.2 – *Continuação da página anterior*

<b>Agentes químicos</b>	<b>Principais fontes em ambientes interiores</b>	<b>Principais Medidas de correção em ambientes interiores</b>
CO	Combustão (cigarros, queimadores de fogões e veículos automotores)	Manter a captação de ar exterior com baixa concentração de poluentes; restringir as fontes de combustão; manter a exaustão em áreas em que ocorre combustão; eliminar a infiltração de CO proveniente de fontes externas; restringir o tabagismo em áreas fechadas
CO <sub>2</sub>	Produtos de metabolismo humano e combustão	Aumentar a renovação de ar externo; restringir as fontes de combustão e o tabagismo em áreas fechadas; eliminar a infiltração de fontes externas
NO <sub>2</sub>	Combustão	Restringir as fontes de combustão; manter a exaustão em áreas em que ocorre combustão; impedir a infiltração de NO <sub>2</sub> proveniente de fontes externas; restringir o tabagismo em áreas fechadas
O <sub>3</sub>	Máquinas copadoras e impressoras a laser	Adotar medidas específicas para reduzir a contaminação dos ambientes interiores, com exaustão do ambiente ou enclausuramento em locais exclusivos para os equipamentos que apresentem grande capacidade de produção de O <sub>3</sub>
Formaldeído	Materiais de acabamento, mobiliário, cola, produtos de limpeza domissanitários	Selecionar os materiais de construção, acabamento e mobiliário que possuam ou emitam menos formaldeído; usar produtos domissanitários que não contenham formaldeído

*Continua na próxima página*

Tabela D.2 – *Continuação da página anterior*

<b>Agentes químicos</b>	<b>Principais fontes em ambientes interiores</b>	<b>Principais Medidas de correção em ambientes interiores</b>
Material particulado	Poeira e fibras	Manter filtragem de acordo com NBR- 6402 da ABNT; evitar isolamento termo- acústico que possa emitir fibras minerais, orgânicas ou sintéticas para o ambiente climatizado; reduzir as fontes internas e externas; higienizar as superfícies fixas e mobiliários sem o uso de vassouras, escovas ou espanadores; selecionar os materiais de construção e acabamento com menor porosidade; adotar medidas específicas para reduzir a contaminação dos ambientes interiores (vide biológicos); restringir o tabagismo em áreas fechadas
Fumo e tabaco	Queima de cigarro, charuto, cachimbo, etc.	Aumentar a quantidade de ar externo admitido para renovação e/ou exaustão dos poluentes; restringir o tabagismo em áreas fechadas
VOC	Cera, mobiliário, produtos usados em limpeza e domissanitários, solventes, materiais de revestimento, tintas, colas, etc.	Selecionar os materiais de construção, acabamento, mobiliário; usar produtos de limpeza e domissanitários que não contenham VOC ou que não apresentem alta taxa de volatilização e toxicidade
COS-V	Queima de combustíveis e utilização de pesticidas	Eliminar a contaminação por fontes pesticidas, inseticidas e a queima de combustíveis; manter a captação de ar exterior afastada de poluentes

Fonte: Autor, adaptado de ANVISA.

*VOC - Compostos Orgânicos Voláteis; COS-V - Compostos Orgânicos Semi- Voláteis; Observações - Os poluentes indicados são aqueles de maior ocorrência nos ambientes de*

*interior, de efeitos conhecidos na saúde humana e de mais fácil detecção pela estrutura laboratorial existente no país.*

Outros poluentes que venham a ser considerados importantes serão incorporados aos indicados, desde que atendam ao disposto no parágrafo anterior.

Para cada grupo de poluentes correlacionados, há uma norma técnica específica para avaliação e controle, sendo publicadas as Normas Técnicas 001, 002, 003 e 004. Em relação ao dióxido de carbono, a correspondente é a Norma Técnica 002. Para temperatura, umidade e velocidade do ar é a 003. E, para material particulado é a Norma Técnica 004.

**NORMA TÉCNICA 002 - Qualidade do Ar Ambiental Interior. Método de Amostragem e Análise da Concentração de Dióxido de Carbono em Ambientes Interiores.**

#### **MÉTODO ANALÍTICO**

**OBJETIVO:** Pesquisa, monitoramento e controle do processo de renovação de ar em ambientes climatizados.

**APLICABILIDADE:** Ambientes interiores climatizados, de uso coletivo.

**MARCADOR EPIDEMIOLÓGICO:** Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) .

**MÉTODO DE AMOSTRAGEM:** Equipamento de leitura direta.

**PERIODICIDADE:** Semestral.

#### **FICHA TÉCNICA DOS AMOSTRADORES:**

**Amostrador:** Leitura Direta por meio de sensor infravermelho não dispersivo ou célula eletroquímica.

**Calibração:** Anual ou de acordo com especificação do fabricante. Faixa: de 0 a 5.000 ppm.

**Exatidão:**  $\pm 50$  ppm + 2% do valor medido

#### **ESTRATÉGIA DE AMOSTRAGEM:**

- Definir o número de amostras de ar interior, tomando por base a área construída climatizada dentro de uma mesma edificação e razão social, seguindo a tabela D.3:
- As unidades funcionais dos estabelecimentos com características epidemiológicas diferenciadas, tais como serviço médico, restaurantes, creches e outros, deverão ser amostrados isoladamente. Ministério da Saúde - MS Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA Este texto não substitui o(s) publicado(s) em Diário Oficial da União.

Tabela D.3: Estratégia de amostragem

Área construída (m <sup>2</sup> )	Número mínimo de amostras
Até 1.000	1
1.000 a 2.000	3
2.000 a 3.000	5
3.000 a 5.000	8
5.000 a 10.000	12
10.000 a 15.000	15
15.000 a 20.000	18
20.000 a 30.000	21
acima de 30.000	25

Fonte: Autor, adaptado ANVISA

- Os pontos amostrais deverão ser distribuídos uniformemente e coletados com o amostrador localizado na altura de 1,5 m do piso, no centro do ambiente ou em zona ocupada.

**PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM:** As medidas deverão ser realizadas em horários de pico de utilização do ambiente.

**NORMA TÉCNICA 003 - Qualidade do Ar Ambiental Interior. Método de Amostragem. Determinação da Temperatura, Umidade e Velocidade do Ar em Ambientes Interiores.**

#### MÉTODO ANALÍTICO

**OBJETIVO:** Pesquisa, monitoramento e controle do processo de renovação de ar em ambientes climatizados. **APLICABILIDADE:** Ambientes interiores climatizados, de uso coletivo.

#### MARCADORES:

Temperatura do ar ( °C )

Umidade do ar (

Velocidade do ar ( m/s ).

**MÉTODO DE AMOSTRAGEM:** Equipamento de leitura direta.

Termo-higrômetro e Anemômetro.

**PERIODICIDADE:** Semestral.

#### FICHA TÉCNICA DOS AMOSTRADORES:

Amostrador: Leitura Direta - Termo-higrômetro.

Princípio de operação: Sensor de temperatura do tipo termo-resistência. Sensor

de umidade do tipo capacitivo ou por condutividade elétrica.

Calibração: Anual. Faixa: 0° C a 70°C de temperatura 5% a 95% de umidade

Exatidão:  $\pm 0,8$  ° C de temperatura  $\pm 5\%$  do valor medido de umidade.

Amostrador: Leitura Direta - Anemômetro.

Princípio de operação: Preferencialmente de sensor de velocidade do ar do tipo fio aquecido ou fio térmico.

Calibração Anual: Faixa: de 0 a 10 m/s Exatidão: 0,1 m/s 4% do valor medido

ESTRATÉGIA DE AMOSTRAGEM:

- Definir o número de amostras de ar interior, tomando por base a área construída climatizada dentro de uma mesma edificação e razão social, seguindo a tabela D.5:

Tabela D.4: Estratégia de amostragem

Área construída (m <sup>2</sup> )	Número mínimo de amostras
Até 1.000	1
1.000 a 2.000	3
2.000 a 3.000	5
3.000 a 5.000	8
5.000 a 10.000	12
10.000 a 15.000	15
15.000 a 20.000	18
20.000 a 30.000	21
acima de 30.000	25

Fonte: Autor, adaptado ANVISA

- As unidades funcionais dos estabelecimentos com características epidemiológicas diferenciadas, tais como serviço médico, restaurantes, creches e outros, deverão ser amostrados isoladamente.
- Os pontos amostrais deverão ser distribuídos uniformemente e coletados com o amostrador localizado na altura de 1,5 m do piso, no centro do ambiente ou em zona ocupada, para o Termo-higrômetro e no espectro de ação do difusor para o Anemômetro.

NORMA TÉCNICA 004 - Qualidade do Ar Ambiental Interior. Método de Amostragem e Análise de Concentração de Aerodispersóides em Ambientes Interiores.

#### MÉTODO ANALÍTICO

OBJETIVO: Pesquisa, monitoramento e controle de aerodispersóides totais em ambientes interiores climatizados.

**APLICABILIDADE:** Ambientes de interior climatizados, de uso coletivo, destinados a ocupações comuns (não especiais).

**MARCADORES:** Poeira Total ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**MÉTODO DE AMOSTRAGEM:** Coleta de aerodispersóides por filtração (MB-3422 da ABNT).

**PERIODICIDADE:** Semestral.

**FICHA TÉCNICA DOS AMOSTRADORES:**

**Amostrador:** Unidade de captação constituída por filtros de PVC, diâmetro de 37 mm e porosidade de 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro de poro específico para poeira total a ser coletada; Suporte de filtro em disco de celulose; Porta-filtro em plástico transparente com diâmetro de 37 mm.

**Aparelhagem:** Bomba de amostragem, que mantenha ao longo do período de coleta, a vazão inicial de calibração com variação de 5%.

**Taxa de Vazão:** 1,0 a 3,0 l/min, recomendado 2,0 l/min.

**Volume Mínimo:** 50 l

**Volume Máximo:** 400 l

**Tempo de Amostragem:** relação entre o volume captado e a taxa de vazão utilizada

**Embalagem:** Rotina

**Calibração:** Em cada procedimento de coleta se operado com bombas diafragmáticas  
**Exatidão:**  $\pm 5\%$  do valor medido

**ESTRATÉGIA DE AMOSTRAGEM:**

- Definir o número de amostras de ar interior, tomando por base a área construída climatizada dentro de uma mesma edificação e razão social, seguindo a tabela D.5:

Tabela D.5: Estratégia de amostragem

Área construída ( $\text{m}^2$ )	Número mínimo de amostras
Até 1.000	1
1.000 a 2.000	3
2.000 a 3.000	5
3.000 a 5.000	8
5.000 a 10.000	12
10.000 a 15.000	15
15.000 a 20.000	18
20.000 a 30.000	21
acima de 30.000	25

Fonte: Autor, adaptado ANVISA



- As unidades funcionais dos estabelecimentos com características epidemiológicas diferenciadas, tais como serviço médico, restaurantes, creches e outros, deverão ser amostrados isoladamente
- Os pontos amostrais deverão ser distribuídos uniformemente e coletados com o amostrador localizado na altura de 1,5 m do piso, no centro do ambiente ou em zona ocupada.

PROCEDIMENTO DE COLETA: MB-3422 da ABNT.

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DAS BOMBAS: NBR- 10.562 da ABNT

PROCEDIMENTO LABORATORIAL: NHO 17 da FUNDACENTRO

Finalizando a análise da resolução da Anvisa, o item V - Fontes Poluentes traz o seguinte texto:

#### V - FONTES POLUENTES

Recomenda que sejam adotadas para fins de pesquisa e com o propósito de levantar dados sobre a realidade brasileira, assim como para avaliação e correção das situações encontradas, as possíveis fontes de poluentes informadas nos Quadros I e II.

A coleta de informações é estimulada apenas com o caráter de pesquisa, com estímulo para a busca de identificação das possíveis fontes poluentes. E, dentro das áreas urbanas, embora as estações de monitoramento em nível de referência possam capturar flutuações temporais na concentração de PM, não é viável usá-las para obter a distribuição espacial devido ao:

- C. alto custo
- D. experiência em manutenção
- E. dimensões das estações