

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA
CAMPUS SÃO JOSÉ

DANIEL VALDELEY MARQUES

**APLICATIVO MÓVEL INTEGRADO COM SENSORES E
ATUADORES PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DA
QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES FECHADOS**

SÃO JOSÉ

2025

DANIEL VALDELEY MARQUES

Aplicativo Móvel Integrado com Sensores e Atuadores para
Monitoramento e Controle da Qualidade do Ar em Ambientes fechados

Projeto de Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Coordenadoria do Curso de
Engenharia de Telecomunicações do campus
São José do Instituto Federal de Santa Cata-
rina

Área de concentração: Telecomunicações

Orientador: Carlos Boabaid Neto, Dr. Eng.

São José

2025

RESUMO

A grande maioria das pessoas passa a maior parte das horas do dia dentro de ambientes fechados. Assim, a qualidade do ar respirado nestes ambientes é um fator crucial para a saúde e o bem-estar das pessoas. Porém, grande parte dos contaminantes físicos, químicos e biológicos presentes no ar são furtivos, ou seja, não são detectados pelo ser humano. Desta forma, monitorar a qualidade do ar nesses locais é essencial, para identificar e mitigar riscos, reduzindo ou eliminando possíveis efeitos negativos sobre a saúde dos ocupantes, garantindo assim um ambiente mais seguro e confortável. Isto é especialmente importante em ambientes onde a qualidade do ar pode flutuar rapidamente, como em salas de aula, escritórios e outros espaços fechados. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um aplicativo móvel que fornece informações em tempo real sobre a qualidade do ar em ambientes fechados. Para isso, o aplicativo será integrado a um sistema de medição e controle, composto por microcontrolador, sensores e dispositivos de comunicação sem fio. O aplicativo será capaz de exibir dados como temperatura, umidade relativa do ar, e concentrações de gás carbônico, de material particulado e de compostos orgânicos voláteis, monitorando continuamente a qualidade do ar, fornecendo dados precisos que ajudam os usuários a compreender os riscos e adotar medidas para um ambiente mais saudável e seguro.

Palavras-chave: Qualidade do Ar. Ambiente interno. Contaminação do ar. Monitoramento. Internet das coisas.

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 4 |
| 1.1 | Objetivo geral | 5 |
| 1.2 | Objetivos específicos | 6 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 7 |
| 2.1 | Qualidade do Ar Interno (QAI) e Seus Impactos | 7 |
| 2.2 | Poluentes Específicos e a Medição de VOCs | 8 |
| 2.3 | Sensores para Monitoramento da Qualidade do Ar | 9 |
| 2.3.1 | Sensor de Dióxido de Carbono (CO₂) | 9 |
| 2.3.2 | Sensor de Material Particulado (PM) | 10 |
| 2.3.3 | Sensores de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) | 12 |
| 2.4 | Calibração de Sensores | 13 |
| 2.4.1 | Calibração de Sensores | 13 |
| 2.5 | Desenvolvimento da Interface e Arquitetura de Software | 14 |
| 2.5.1 | Abordagens para o Desenvolvimento de Aplicativos Móveis | 14 |
| 2.6 | Protocolo e Arquitetura para comunicação com IoT | 15 |
| 2.6.1 | O Protocolo MQTT | 15 |
| 3 | PROPOSTA | 17 |
| 3.1 | Proposta da arquitetura do sistema | 17 |
| 3.2 | Componentes de Hardware e Software | 18 |
| 3.3 | Especificação dos Atores e Regras de Negócio da Aplicação | 19 |
| 3.4 | Metodologia de Apresentação da Informação | 19 |
| 3.5 | Cronograma | 20 |
| | Referências | 22 |

1 INTRODUÇÃO

Pessoas passam a maior parte do tempo em ambientes fechados, por uma combinação de fatores sociais, econômicos e tecnológicos. O uso de edificações foi motivado pela necessidade de controlar o ambiente visando conforto e proteção contra os rigores do clima natural, como temperaturas extremas, vento e chuvas. A imensa maioria das atividades diárias modernas acontece em ambientes fechados, em escritórios, fábricas, estabelecimentos comerciais, e com o aumento do trabalho remoto, também em casa. Com o crescimento das cidades, os espaços ao ar livre são mais limitados, e muitas atividades diárias, como compras e lazer, acontecem dentro de estabelecimentos cobertos. A ascensão da tecnologia trouxe alternativas de lazer, como televisão, videogames, redes sociais e outras formas de entretenimento digital, que reduzem o tempo que as pessoas passam ao ar livre. Tudo isto significa que uma grande parte do dia útil é passado dentro de ambientes fechados.

O ar que respiramos dentro de casa ou em outros recintos pode estar repleto de partículas invisíveis a olho nú, que afetam a saúde sem serem percebidos. Dentre os principais poluentes, pode-se citar: (I) gases tóxicos: monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio liberados por fogões, aquecedores e sistemas de combustão; (II) partículas finas e poeira, originadas de carpetes, tecidos, fumaça de cigarro e poluentes externos; (III) compostos orgânicos voláteis (COVs), provenientes de móveis, tintas, produtos de limpeza e até materiais de construção; (IV) mofo e fungos, que crescem em ambientes úmidos, podendo causar problemas respiratórios e alergias. Além disso, o próprio dióxido de carbono (CO₂), embora seja um produto natural resultado da própria respiração humana e de outros organismos, também pode afetar a saúde quando sua concentração se torna excessiva.

Estes poluentes podem ter um severo impacto na saúde e bem-estar dos seres humanos, a saber: (I) doenças respiratórias: vários poluentes podem agravar asma, bronquite e outras condições pulmonares; (II) fadiga e baixa produtividade: ambientes insalubres podem causar cansaço e dificuldades de concentração; (III) problemas na qualidade do sono: exposição prolongada a poluentes pode afetar padrões de sono e gerar desconforto. Estudos mostram que o ar interno pode ser até cinco vezes mais poluído do que o ar externo, o que torna ainda mais crucial a monitoração e controle da qualidade do ar em ambientes fechados (ESA, 2023).

Além dos impactos diretos na saúde, a má qualidade do ar pode afetar a produtividade e o desempenho cognitivo, levando a um aumento no absenteísmo devido às doenças, e uma redução na eficiência no trabalho e nos estudos.

Ambientes fechados frequentemente apresentam ventilação (renovação de ar) insuficiente, resultando em acúmulo de poluentes como o dióxido de carbono (CO₂), compostos orgânicos voláteis (COVs) e partículas em suspensão. Por sua vez, a ventilação deficiente pode contribuir para aumentar consideravelmente o risco de transmissão de doenças infecciosas (QIAN; ZHENG, 2018). A medição de quantidades excessivas de poluentes em um ambiente interno é um indicador claro da deficiência de ventilação deste ambiente.

Desta forma, a falta de um sistema eficiente para monitorar e controlar a qualidade do ar agrava esses problemas, afetando negativamente a saúde e o bem-estar das pessoas.

A Resolução RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003 (ANVISA, 2023), determina que a concentração de dióxido de carbono (CO₂) em ambientes climatizados de uso coletivo não deve ultrapassar 1.000 ppm, e os aerodispersóides no ar devem estar abaixo de 80 mg/m³.

Sistemas de ventilação controlados por demanda, que ajustam a ventilação com base na concentração de CO₂, são eficazes para manter a qualidade do ar dentro dos parâmetros recomendados, promovendo ambientes mais saudáveis (METELSKIY, 2011).

Considerando os desafios para monitorar e controlar o níveis adequados da qualidade do ar em ambientes internos, bem como a diversidade de poluentes existentes, este trabalho propõe a implementação de um aplicativo integrado a um sistema de medição e controle de qualidade do ar, conectado ao sistema de ventilação do ambiente. O aplicativo será capaz de fornecer dados relevantes sobre a qualidade do ar interno, dispensando a necessidade de dispositivos fixos com *display* para a visualização das informações. Dessa forma, permitirá a interoperabilidade e o acesso direto às informações por meio de dispositivos móveis pessoais.

Diante do exposto, o problema de pesquisa que norteia este trabalho é formulado da seguinte maneira: como desenvolver um aplicativo móvel que se integre a um sistema de sensoriamento e controle de QAI para fornecer, de forma clara e em tempo real, informações sobre a qualidade do ar a fim de promover a conscientização e a segurança dos ocupantes de um ambiente fechado? A busca por uma resposta a esta questão se desdobra nos objetivos apresentados a seguir.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver um aplicativo simples para monitoramento da qualidade do ar em ambientes fechados, integrando-o a um sistema de medição e controle existente, com o propósito de fornecer dados em tempo real sobre temperatura, umidade, concentrações de CO₂, compostos orgânicos voláteis (VOCs) e material particulado (PM) aos ocupantes de uma sala de aula do IFSC - Campus São José, durante o semestre letivo de 2025.2.

1.2 Objetivos específicos

De maneira mais específica, os objetivos deste trabalho são identificar a melhor forma de traduzir dados técnicos complexos de sensores em informações visuais compreensíveis para ocupantes das salas de aula, e testar a viabilidade de uma aplicação com essa finalidade. O estudo se concentrará em implementar uma interface que se adapte ao sistema de monitoramento já desenvolvido no IFSC – Campus São José, servindo como uma prova de conceito para caracterizar sua aplicabilidade em outros ambientes monitorados.

O propósito é aplicar a tecnologia para fortalecer a conscientização sobre saúde ambiental, favorecendo a disseminação de dados cruciais sobre as condições do ar que são frequentemente ignorados. A relação que os indivíduos estabelecem com seu ambiente ganha importância quando se considera os impactos da QAI na saúde e na produtividade. Nesse sentido, a pesquisa visa comparar a percepção dos ocupantes sobre o ambiente antes e depois do acesso facilitado aos dados, permitindo-lhes tomar decisões mais informadas, como a de ventilar o espaço. Assim, o emprego tecnológico irá proporcionar um melhor entendimento sobre a dinâmica da qualidade do ar em ambientes fechados.

Diante disso, a relevância e justificativa deste trabalho se dão na promoção de ambientes mais saudáveis por meio da capacitação dos indivíduos. A intenção é que essa facilidade de acesso à informação contribua para distinguir os fatores que levam à exposição a poluentes, visando o bem-estar e o desempenho dos ocupantes. Portanto, a proposta geral do aplicativo é construir um canal direto de monitoramento, com o propósito de aproximar os indivíduos das condições do ambiente que frequentam. As implicações do uso deste aplicativo almejam criar uma maior conscientização sobre a importância da ventilação e da QAI. O aplicativo permitirá ser a interface de acesso principal dos ocupantes, sendo um canal direto para visualizar dados cruciais, como os níveis de CO₂, material particulado (PM) e os compostos orgânicos voláteis (VOCs). A ideia é ser um meio de consulta objetivo, fácil e simples, pois as pessoas precisam ter esse acesso facilitado à informação sobre o ar que respiram.

Os dados sobre os parâmetros do ar serão coletados e disponibilizados em tempo real, e para isso, será necessário selecionar as informações mais relevantes para a interface. Conforme a validação realizada no trabalho de referência (KUHNNEN, 2024), nem todos os sensores possuem o mesmo nível de calibração inicial. Nesse sentido, informações críticas e bem calibradas, como os níveis de CO₂, terão destaque para evitar sobrecarregar o usuário com dados de maior incerteza.

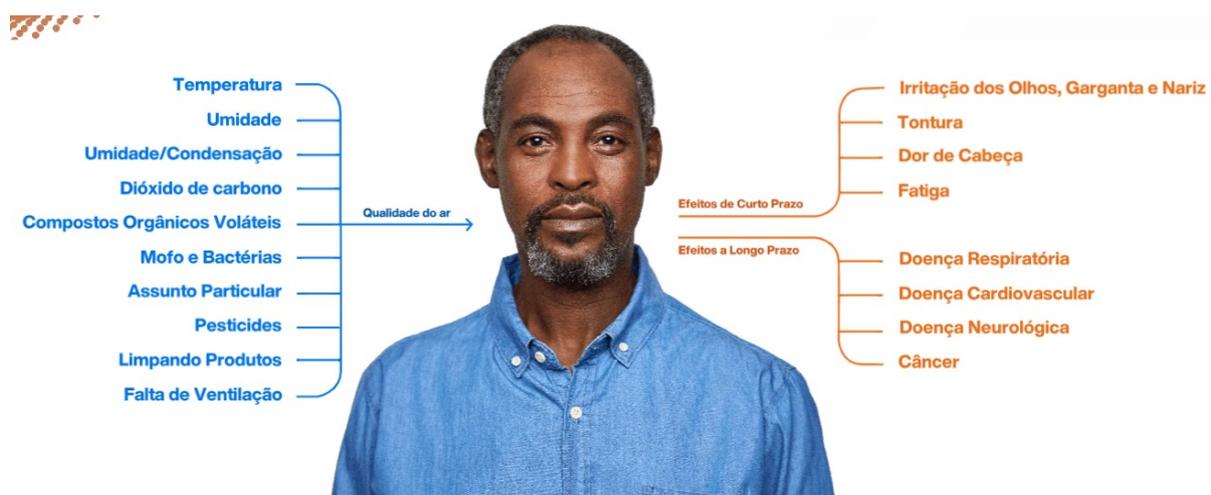
Ressalta-se, contudo, que o aplicativo não é, por si só, a solução para a má qualidade do ar, mas sim uma ferramenta para diagnosticar e conscientizar. Sua efetividade dependerá da ação dos usuários e gestores do ambiente em resposta aos dados apresentados, e da manutenção contínua do sistema de hardware que coleta as informações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Qualidade do Ar Interno (QAI) e Seus Impactos

A preocupação com a Qualidade do Ar Interno (QAI) tem ganhado destaque à medida que se reconhece que os indivíduos passam a maior parte do seu tempo em ambientes fechados. A qualidade do ar nesses locais é um fator crucial para a saúde, pois o ar interno pode ser significativamente mais poluído que o externo. A poluição do ar interno tradicionalmente recebeu menos atenção do que a poluição externa, apesar de os níveis de poluentes internos serem tipicamente o dobro, e de as pessoas passarem de 80 a 90% de suas vidas em edifícios cada vez mais herméticos (GONZALEZ-MARTÍN et al., 2021). A má qualidade do ar está associada a uma série de problemas de saúde, incluindo doenças respiratórias, alergias e até câncer, além de impactar negativamente a produtividade e o desempenho cognitivo.

Figura 1 – Efeitos da má qualidade do ar



Os poluentes de maior relevância incluem o material particulado (PM) e os compostos orgânicos voláteis (VOCs). O material particulado, especialmente a fração PM_{2,5}, é uma preocupação significativa devido à sua capacidade de penetrar profundamente no sistema respiratório. Dentre os VOCs, o Formaldeído (CH₂O) é de particular interesse devido à sua ampla utilização em materiais de construção e mobiliário e seu conhecido potencial carcinogênico. Este composto químico é amplamente utilizado em resinas, colas, tintas, produtos de papel, cosméticos, equipamentos eletrônicos, agentes de limpeza e tecidos. O formaldeído está presente em materiais de construção, como espumas isolantes de materiais à base de madeira empregados em pisos ou móveis. No entanto, as emissões desses materiais (como compensado, aglomerado ou MDF) geralmente decaem ao longo de algumas semanas. O formaldeído também é produzido pela oxidação de ou-

tros compostos orgânicos voláteis (VOCs) em presença de ozônio ou radiação, bem como pela reação incompleta de hidrocarbonetos (GONZALEZ-MARTÍN et al., 2021). Nesse complexo cenário de múltiplos poluentes, o dióxido de carbono (CO₂) é frequentemente empregado como um indicador primário para a avaliação da taxa de renovação do ar, visto que sua concentração está diretamente ligada à ocupação e ao metabolismo humano. No Brasil, a Resolução RE nº 9 da ANVISA estabelece um valor de referência para o controle deste indicador em ambientes coletivos, fixando uma concentração máxima de 1.000 ppm (ANVISA, 2023).

2.2 Poluentes Específicos e a Medição de VOCs

Enquanto o CO₂ indica a qualidade da ventilação, os Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) representam a poluição química vinda de materiais de construção, móveis, produtos de limpeza, entre outros. O conjunto de compostos voláteis formam o TVOC (Total de VOCs). Embora a medição do TVOC (Total de VOCs) é um bom parâmetro de triagem, não é adequado para avaliação de riscos à saúde, pois soma compostos de toxicidades muito diferentes. Para uma análise de saúde, é mais relevante medir compostos específicos (SALTHAMMER, 2022).

O estudo focado em um campus universitário valida essa abordagem ao analisar os riscos de compostos individuais. A pesquisa identificou que, em ambientes educacionais, o risco não se distribui uniformemente entre os VOCs. Foi constatado que a Acroleína apresentou o maior risco não carcinogênico em todos os locais, incluindo salas de aula, sendo suas fontes associadas a móveis de madeira e atividades de cozinha. Em relação ao risco carcinogênico, o 1,2-Dicloroetano, associado a produtos de limpeza e desinfetantes, foi o composto de maior preocupação, especialmente em dormitórios (JIN et al., 2023). Além disso, o Benzeno e o Formaldeído (CH₂O) são consistentemente citados na literatura como poluentes de alto risco em ambientes internos, com o Formaldeído sendo um conhecido carcinógeno emitido por resinas e materiais de construção amplamente utilizados.

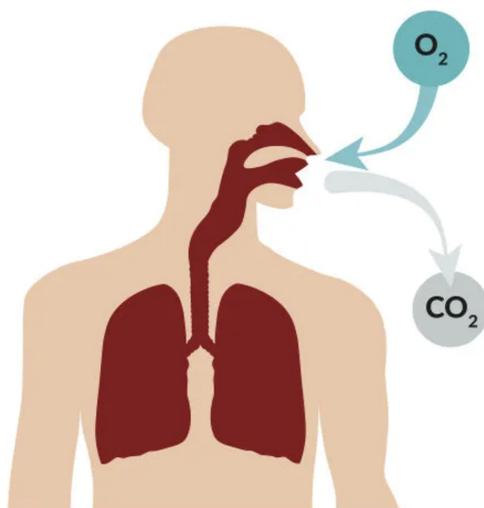
O Formaldeído, especificamente, é um dos compostos que exige atenção especial no monitoramento da qualidade do ar interno. A Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) o classifica como um carcinógeno, capaz de causar efeitos negativos à saúde em concentrações tão baixas quanto 0.1 ppm. Por ser utilizado em inúmeros processos de fabricação, é comum que sua concentração em ambientes internos seja substancialmente maior que no ar externo. As principais fontes incluem produtos de madeira prensada (como pisos e painéis de partículas), carpetes, tintas, adesivos e agentes de limpeza, que podem levar de horas a meses para liberar o excesso de formaldeído retido (SAUERMAN, 2024).

2.3 Sensores para Monitoramento da Qualidade do Ar

2.3.1 Sensor de Dióxido de Carbono (CO₂)

Conforme estabelecido, o CO₂ é um indicador primário da qualidade da ventilação em ambientes ocupados.

Figura 2 – Respiração liberação de CO₂



É por meio da respiração que conseguimos captar o oxigênio do ar e liberar o gás carbônico

Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/movimentos-respiratorios.htm>

Para sua medição, a tecnologia mais confiável e precisa é a de Infravermelho Não Dispersivo (NDIR). O princípio de funcionamento do NDIR se baseia na absorção de radiação infravermelha em comprimentos de onda específicos por diferentes moléculas de gás. Um sensor NDIR é composto por uma fonte de luz infravermelha, uma câmara de amostra por onde o ar passa, e um detector com filtros ópticos. A quantidade de luz que chega ao detector é inversamente proporcional à concentração do gás-alvo, permitindo um cálculo preciso da sua presença.

No projeto de hardware de referência (KUHLEN, 2024), foi realizada uma análise comparativa entre o sensor SCD30 da Sensirion e o T6615-10k da Amphenol, ambos utilizando a tecnologia NDIR. O SCD30 foi o escolhido por apresentar maior precisão, menor consumo de energia e por integrar também sensores de temperatura e umidade, reduzindo a complexidade e o custo do protótipo. Outros sensores NDIR, como o MH-Z19C da Winsen, também são adequados para esta aplicação, oferecendo uma faixa de detecção de 400 a 10.000 ppm, ideal para o monitoramento de QAI, embora meçam exclusivamente CO₂ e exijam sensores adicionais para temperatura e umidade.

É importante notar que muitos desses sensores, incluindo o SCD30 e o MH-Z19C,

possuem mecanismos de autocalibração, onde o ponto zero é ajustado periodicamente tomando como base a concentração de 400 ppm, que é o nível típico de CO₂ no ar externo. Isso é crucial para manter a precisão das medições ao longo do tempo.

Figura 3 – Sensor SCD30

Datasheet Sensirion SCD30 Sensor Module CO₂, humidity, and temperature sensor

- NDIR CO₂ sensor technology
- Integrated temperature and humidity sensor
- Best performance-to-price ratio
- Dual-channel detection for superior stability
- Small form factor: 35 mm x 23 mm x 7 mm
- Measurement range: 400 ppm – 10.000 ppm
- Accuracy: $\pm(30 \text{ ppm} + 3\%)$
- Current consumption: 19 mA @ 1 meas. per 2 s.
- Fully calibrated and linearized
- Digital interface UART or I²C



Fonte: **Sensirion**

Figura 4 – Sensor MHZ-Z19C

Winsen

炜盛科技 Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

www.winsen-sensor.com

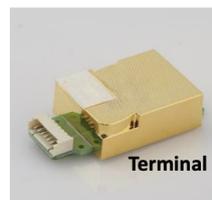
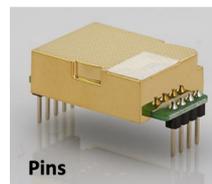
MH-Z19C NDIR CO₂ Module

Profile

MH-Z19C NDIR infrared gas module is a common type, small size sensor, pins type or terminal type, using non-dispersive infrared (NDIR) principle to detect the existence of CO₂ in the air, with good selectivity, non-oxygen dependent and long life. Built-in temperature compensation; and it has UART output and PWM output. It is developed by the tight integration of mature infrared absorbing gas detection technology, precision optical circuit design and superior circuit design.

Applications

- | | |
|--------------------------------|---------------------|
| *HVAC refrigeration | *Air cleaner device |
| *Indoor air quality monitoring | *Smart home |
| *Ventilation system | *School |



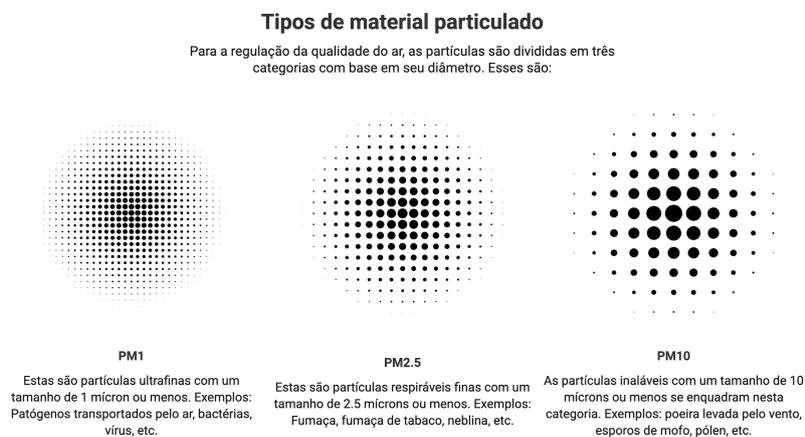
Fonte: **Winsen**

2.3.2 Sensor de Material Particulado (PM)

PM, material particulado ou particulado é uma mistura de partículas líquidas e sólidas que ficam suspensas no ar. Eles podem variar de partículas microscópicas a partículas como fumaça, fuligem, partículas líquidas e poeira que podem ser vistas a olho nu. Estes são categorizados em 3 categorias, com base em seu tamanho. São PM₁₀ (grosso,

visível a olho nu), PM2.5 (partículas finas) e PM1 (partículas ultrafinas) (PRANAIR, 2025). A ANVISA recomenda que a soma de aerodispersóides totais no ar não ultrapasse 80 mg/m³ (ANVISA, 2023).

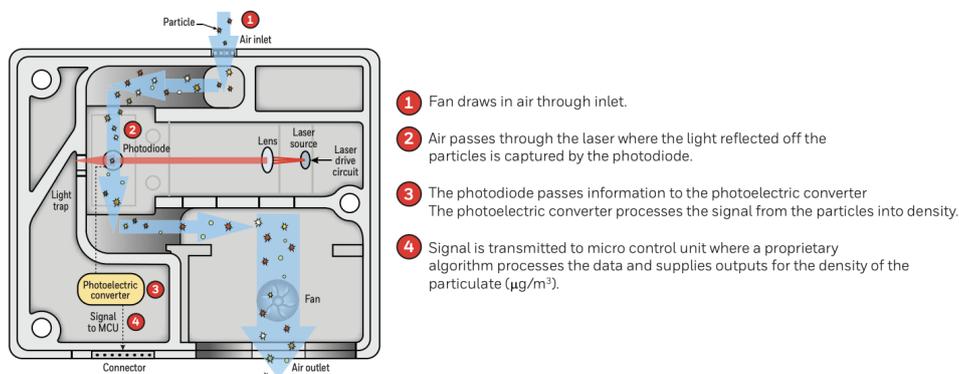
Figura 5 – Tipos de material particulado



Fonte: PranAir (2025)

No sistema de referência (KUHNNEN, 2024), foi utilizado o sensor HPM115C0-004 da Honeywell, que emprega uma técnica de espalhamento de laser para detectar e contar as partículas, com foco na medição de PM 2,5. Este sensor também é capaz de estimar as concentrações de PM 1,0 e PM 10 com base em uma relação empírica com os dados de PM 2,5. No entanto, o próprio trabalho de referência destaca que as leituras de material particulado podem apresentar distorções e que a calibração do sensor é um ponto de melhoria fundamental, uma vez que os valores medidos nos ensaios foram consistentemente superiores aos limites recomendados, o que pode ser devido a uma falta de calibração ou à sensibilidade do sensor a eventos como a dispersão de poeira acumulada no sistema de ventilação.

Figura 6 – Funcionamento do sensor de PM

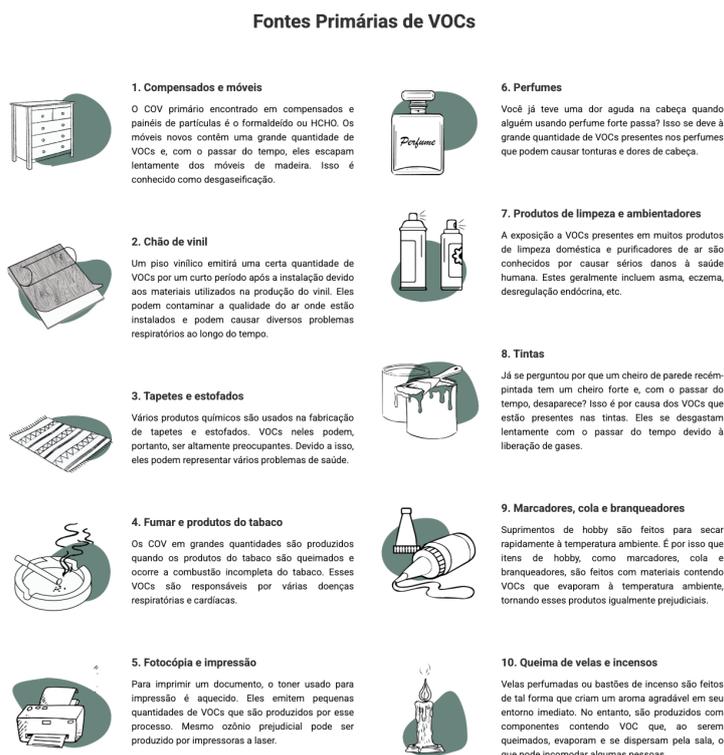


Fonte: Honeywell

2.3.3 Sensores de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs)

Os compostos orgânicos voláteis (VOCs) são uma ampla categoria de compostos orgânicos transportados pelo ar, que contêm carbono e hidrogênio, evaporam e se dispersam facilmente à temperatura ambiente. Os VOCs são emitidos por uma ampla gama de materiais de construção, tintas, móveis e produtos de consumo diário. Você saberá quando um VOC está ao seu redor apenas pelo cheiro forte dele (PRANAIR, 2025).

Figura 7 – Fonte primárias de VOCs



Fonte: PranAir (2025)

Para uma análise mais completa da QAI, a medição de VOCs é essencial. Como argumentado por (SALTHAMMER, 2022), a medição do TVOC (Total de VOCs) é útil como um parâmetro de triagem, mas para uma avaliação de risco à saúde, a medição de compostos específicos é mais relevante. Formaldeído (CH₂O): Conforme destacado pela literatura, o Formaldeído é um dos VOCs de maior risco em ambientes internos, classificado como carcinógeno pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC). Suas fontes são ubíquas, incluindo resinas em móveis de madeira prensada, tintas e adesivos. Sensores específicos para CH₂O, como o ZE08-CH₂O da Winsen, utilizam a tecnologia eletroquímica e são projetados para detectar as baixas concentrações (na faixa de 0 a 5 ppm) relevantes para a saúde humana.

Figura 8 – Sensor ZE08-CH2O

Electrochemical CH2O Detection Module ZE08-CH2O**Profile**

ZE08-CH2O is a general-purpose and miniaturization electrochemical formaldehyde detection module. It utilizes electrochemical principle to detect CH₂O in air which makes the module with high selectivity and stability. It is built-in temperature sensor to make temperature compensation. It has the digital output and analog voltage output at the same time. It is a combination of mature electrochemical detection principle and sophisticated circuit design.

**Features**

- *High sensitivity & resolution, Low power consumption, Long life
- *UART/Analog Voltage/PWM wave output
- * Good stability, excellent ability of Anti-interference
- * Temperature compensation , Excellent Linear output

Fonte: **Winsen**

2.4 Calibração de Sensores

Comentado, com base na pesquisa o desenvolvimento desta parte seria de alta complexidade sendo necessário um tema de tcc para abordar técnicas e modelos para calibração de sensores

2.4.1 Calibração de Sensores

A precisão de qualquer estratégia de controle depende diretamente da qualidade dos dados fornecidos pelos sensores. A revisão sobre sensores de baixo custo (LCS - Low-Cost Sensors) destacam que a calibração é um passo obrigatório e crucial (ALFANO et al., 2020).

Desempenho com e sem Calibração: Um estudo abrangente sobre sensores de PM (ALFANO et al., 2020) aponta que, com uma calibração adequada em campo, sensores de baixo custo podem atingir um coeficiente de correlação (R^2) de até 0,99 em relação a instrumentos de referência. No entanto, sem essa calibração, os mesmos sensores podem apresentar um R^2 inferior a 0,5, tornando seus dados pouco confiáveis.

Fatores de Interferência: A performance dos sensores é altamente suscetível a fatores ambientais. A umidade relativa (RH) é citada como o principal interferente para sensores de PM, com a precisão caindo drasticamente quando a RH ultrapassa 80-85% (GIORDANO et al., 2021).

Calibração em Campo vs. Laboratório: A literatura é unânime em afirmar que a calibração de fábrica ou em laboratório é insuficiente. É essencial realizar uma calibração por colocação (collocation calibration), ou seja, instalar o sensor de baixo

custo ao lado de um instrumento de referência no ambiente real de operação para ajustar suas leituras às condições locais e sazonais. O artigo de Giordano et al. (2021) fornece um guia de melhores práticas para este processo, recomendando períodos de calibração que abranjam diferentes condições climáticas e de poluição para garantir a robustez do modelo de correção.

Qualidade vs. Quantidade: Outro ponto fundamental levantado na literatura é que a precisão de um sistema de monitoramento se beneficia mais do uso de um único sensor de alta qualidade ("premium") do que de uma rede de múltiplos sensores de baixa qualidade sem calibração. O estudo de Rackes, Ben-David e Waring (2017) demonstrou que o erro intrínseco de sensores de grau típico pode ser maior que a variação real do poluente no espaço, fazendo com que a adição de mais sensores de baixa qualidade possa, paradoxalmente, degradar a acurácia geral do sistema.

2.5 Desenvolvimento da Interface e Arquitetura de Software

A implementação de uma solução de QAI eficaz não se limita ao hardware de sensoriamento; a forma como os dados são processados, transmitidos e apresentados ao usuário final é igualmente determinante para o sucesso do sistema. Esta seção detalha os conceitos e tecnologias que fundamentam o desenvolvimento da camada de software do projeto: o aplicativo móvel.

2.5.1 Abordagens para o Desenvolvimento de Aplicativos Móveis

A escolha da plataforma de desenvolvimento é uma decisão estratégica que impacta diretamente o tempo, o custo e a manutenibilidade do projeto. Conforme a literatura da área, as abordagens se dividem em duas categorias principais: nativa e híbrida. O desenvolvimento nativo envolve a criação de códigos-fonte separados para cada sistema operacional (SO), como iOS e Android, utilizando suas respectivas linguagens e ferramentas. No caso do Android, utiliza-se geralmente o Android Studio com as linguagens Java ou Kotlin, enquanto no iOS é comum o uso do Xcode com Swift ou Objective-C. Essa abordagem garante a máxima performance e acesso irrestrito aos recursos do dispositivo. Contudo, para um projeto de prova de conceito como este, onde o acesso a hardware nativo complexo não é um requisito e a agilidade é valorizada, a duplicação de esforços torna essa opção menos viável. É necessário manter equipes diferentes, conhecimento técnico específico para cada plataforma, além de processos de testes, distribuição e manutenção independentes.

Apenas como comparação, os aplicativos nativos são criados apenas para um sistema operacional (iOS/Android) dos dispositivos móveis. Nesse caso, o desenvolvimento usa somente as linguagens aceitas pela plataforma específica, ou seja: é necessário escrever

códigos separados. Já os híbridos têm uma única base de código que é compatível com vários sistemas operacionais. É por isso que o desenvolvimento de aplicativos híbridos é uma abordagem mais fácil e econômica para criar aplicativos móveis (MARQUES, 2024).

A abordagem híbrida, permite o desenvolvimento de uma única base de código que pode ser compilada para múltiplas plataformas. Frameworks como React Native e Flutter lideram este segmento. A principal vantagem é a otimização de recursos e a aceleração do ciclo de desenvolvimento. Considerando que o objetivo deste trabalho é a criação de uma interface de visualização de dados, onde a performance gráfica e a consistência visual entre as plataformas são desejáveis, o Flutter se apresenta como uma escolha tecnológica adequada, devido à sua arquitetura de renderização própria que favorece interfaces fluidas e personalizadas. Desenvolvido pelo Google, o é um kit de desenvolvimento de interface de usuário (UI toolkit) de código aberto, criado pela Google em 2017. É apreciado pelos muitos recursos que oferece, como a sua rica coleção de widgets e atualizações em tempo real (MARQUES, 2024).

2.6 Protocolo e Arquitetura para comunicação com IoT

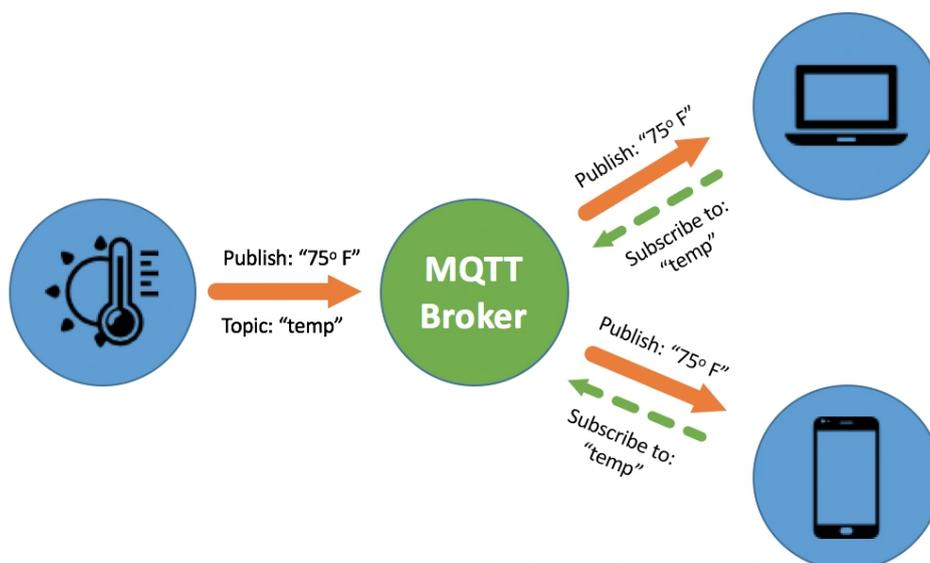
Protocolos e Arquiteturas para Comunicação em IoT A viabilização de um sistema de monitoramento em tempo real, como o proposto neste trabalho, depende de uma arquitetura de comunicação que seja, ao mesmo tempo, eficiente e escalável para lidar com múltiplos dispositivos. Em sistemas de Internet das Coisas (IoT), onde microcontroladores com recursos limitados precisam enviar dados de telemetria de forma contínua, os protocolos de comunicação tradicionais do modelo requisição-resposta, como o HTTP, podem se mostrar ineficientes. A sobrecarga gerada pela necessidade de estabelecer uma nova conexão TCP e os cabeçalhos HTTP para cada pequena mensagem torna essa abordagem custosa em termos de energia e largura de banda.

Nesse contexto, protocolos projetados especificamente para IoT se tornam essenciais. O protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) se estabeleceu como um padrão de mercado, sendo a escolha de comunicação no sistema de hardware de referência deste projeto.

2.6.1 O Protocolo MQTT

O MQTT é um protocolo de mensagens leve, que opera sobre TCP/IP e é baseado no padrão publicar/assinar (publish-subscribe). Ele foi projetado no final dos anos 90 pela IBM para ser utilizado em redes com baixa largura de banda ou pouco confiáveis, o que o torna ideal para conectar dispositivos de IoT (YUAN, 2021). Em 2014, tornou-se um padrão aberto mantido pela organização OASIS, o que impulsionou sua adoção em massa. A sua principal característica é a leveza, o que minimiza a sobrecarga na rede e o

Figura 9 – Broker MQTT - Publish/Subscriber



Fonte: <https://rightech.io/en/developers/faq/mqtt>

consumo de recursos em dispositivos com poder de processamento e memória limitados.

A arquitetura do MQTT é fundamentada em três componentes principais, que se comunicam de forma desacoplada:

- **Publisher (Publicador):** É o cliente que envia as mensagens. No contexto deste projeto, o microcontrolador ESP8266, conectado aos sensores, atua como um Publisher, publicando os dados de QAI.
- **Subscriber (Assinante):** É o cliente que recebe as mensagens. O aplicativo móvel a ser desenvolvido atuará como um Subscriber.
- **Broker (Intermediário):** É o servidor central que recebe as mensagens de todos os Publishers e as encaminha para os Subscribers apropriados.

A comunicação não é direta entre os clientes, mas sim mediada pelo Broker através de tópicos (topics). Um tópico é um "canal" nomeado, com uma estrutura hierárquica similar a um caminho de arquivos (ex: ifsc/sala05/temperatura), para o qual um Publisher envia uma mensagem. Os Subscribers, por sua vez, se inscrevem nos tópicos de seu interesse e recebem todas as mensagens publicadas neles. Os Publishers não precisam saber quem são os Subscribers, e vice-versa. Eles só precisam conhecer o endereço do Broker e o nome do tópico, o que torna o sistema altamente escalável e flexível, permitindo que múltiplos aplicativos e serviços consumam os mesmos dados simultaneamente.

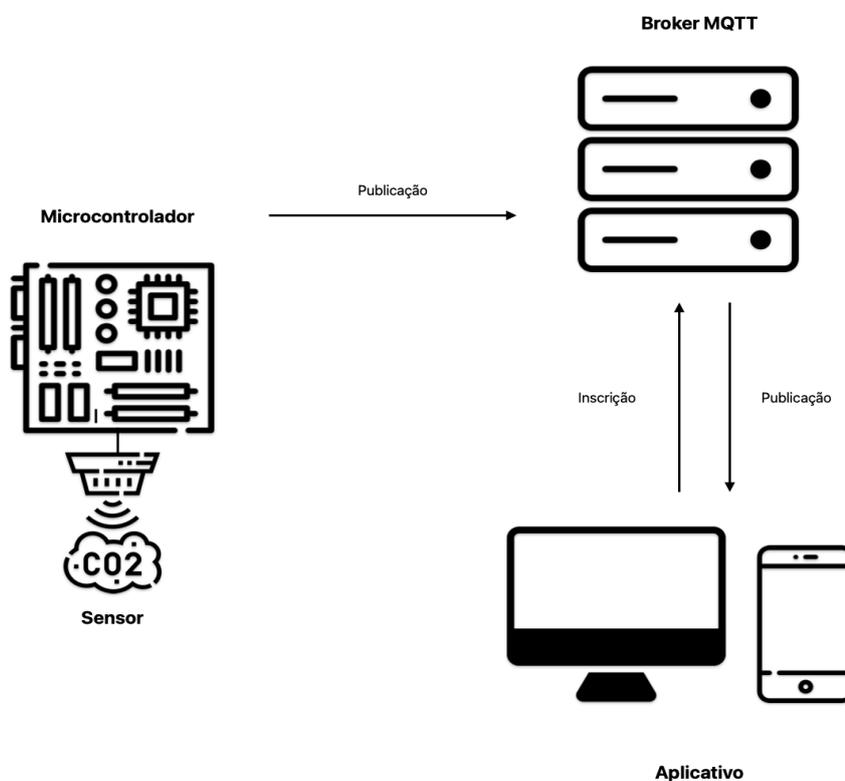
3 PROPOSTA

Neste capítulo, abordamos a solução proposta para o desenvolvimento do aplicativo de monitoramento e controle da Qualidade do Ar Interno (QAI). Para tanto, definimos, nas seções a seguir, a arquitetura do sistema, os componentes de hardware e software, os atores da aplicação, as regras de negócio e a metodologia de apresentação das informações, que guiarão a implementação deste projeto. O trabalho se posicionará como uma prova de conceito, com o objetivo de validar a viabilidade e a eficácia de uma interface móvel para um sistema de monitoramento de QAI.

3.1 Proposta da arquitetura do sistema

A eficácia de um sistema de QAI depende de uma arquitetura robusta que integre hardware e software de forma coesa. A solução proposta neste trabalho se acopla a uma infraestrutura de hardware pré-existente, desenvolvida e validada no trabalho (KUHNNEN, 2024), e se concentra no desenvolvimento da camada de interação com o usuário: o aplicativo móvel.

Figura 10 – Proposta da arquitetura do sistema



Fonte: Própria

- Camada de Sensoriamento (Hardware): O protótipo físico, instalado no ambiente a ser monitorado, é responsável pela coleta dos dados brutos. Ele é composto por um conjunto de sensores e um microcontrolador central.
- Camada de Comunicação IoT: Os dados coletados são enviados pelo microcontrolador a um servidor intermediário (Broker) utilizando o protocolo MQTT.
- Camada de Backend: Um servidor na nuvem executa o Broker MQTT, que gerencia a distribuição das mensagens. Os dados são consumidos por serviços como o Node-RED, para visualização em dashboards web, e armazenados em um banco de dados para análises históricas.
- Camada de Apresentação: O aplicativo móvel a ser desenvolvido atuará como um cliente (subscriber) do Broker MQTT, recebendo os dados de QAI em tempo real e apresentando-os ao usuário final de forma clara e intuitiva.

3.2 Componentes de Hardware e Software

A solução de software proposta será construída sobre uma base de hardware e protocolos bem definidos, aproveitando os componentes já selecionados e testados no trabalho de referência.

- Sensores: O sistema de hardware utiliza um conjunto de sensores para abranger os principais indicadores de QAI. O sensor SCD30 da Sensirion, baseado na tecnologia NDIR (Infravermelho Não Dispersivo), é responsável pela medição precisa de CO₂, temperatura e umidade. Para o monitoramento de material particulado, o protótipo emprega o sensor HPM115C0-004 da Honeywell, que utiliza uma técnica de espalhamento de laser para detectar partículas, com foco na fração PM 2,5.
- Microcontrolador: O cérebro do protótipo de hardware é o ESP8266, um microcontrolador de baixo custo com conectividade Wi-Fi nativa. Ele é responsável por ler os dados dos sensores através das interfaces de comunicação I2C e UART, processar essas informações e publicá-las no Broker MQTT.
- Broker MQTT: Como intermediário de comunicação, o Broker é a peça central que conecta o hardware ao aplicativo. Para o desenvolvimento e validação deste projeto, será utilizada uma instância do Eclipse Mosquitto, um broker MQTT de código aberto, leve e de alta performance, adequado para o escopo do trabalho.
- Aplicativo Móvel (Flutter): A camada de software, que constitui a interface direta com o usuário, será desenvolvida utilizando o framework Flutter. Esta escolha se

insere na abordagem de desenvolvimento híbrido, que, conforme a revisão bibliográfica, otimiza o tempo e o custo do projeto ao permitir a criação de uma única base de código para os sistemas operacionais Android e iOS.

3.3 Especificação dos Atores e Regras de Negócio da Aplicação

Atores da Aplicação:

- Ocupante (Usuário Padrão): Representa o usuário final, como um aluno ou professor. Este ator pode visualizar os dados de QAI em tempo real da sala em que se encontra, acessar um histórico simplificado das medições e receber alertas.
- Gestor do Ambiente (Usuário Administrador): Representa a equipe de gerencia, segurança ou administração da sala. Este ator, além das permissões do Ocupante, poderá ter acesso a um painel com dados de todas as salas monitoradas e, em futuras versões, controlar remotamente o sistema de ventilação.

Regras de Negócio:

- Acesso à Informação: O aplicativo deve se conectar ao Broker MQTT para receber os dados dos sensores em tempo real.
- Histórico de Dados: O usuário deve ter acesso a um gráfico simples que mostre a evolução dos principais parâmetros (como CO₂) nas últimas horas.
- Controle de Ventilação (Escopo Futuro): O aplicativo deve ser projetado de forma a permitir, em futuras versões, que o ator "Gestor do Ambiente" possa enviar comandos para ativar, desativar ou ajustar o nível do sistema de ventilação.

3.4 Metodologia de Apresentação da Informação

A eficácia do aplicativo depende de sua capacidade de traduzir dados técnicos complexos em informação compreensível e acionável para um público leigo. A literatura sobre monitoramento de QAI enfatiza a importância de não sobrecarregar o usuário com números brutos, cuja interpretação exige conhecimento especializado. Conforme Boerstra, (BOERSTRA; RAUE; CHENG, 20219), a melhor prática é transformar dados em informação que os usuários possam entender intuitivamente.

Reconhecendo as limitações de acurácia de sensores de baixo custo sem uma calibração rigorosa em campo, conforme amplamente documentado na literatura (GIORDANO et al., 2021), a interface deste aplicativo foi projetada para focar na comunicação de tendências e na indicação de estados qualitativos, em vez de se apresentar como um

instrumento de medição de precisão. A utilização de um sistema de cores será o pilar desta abordagem, comunicando o estado do ambiente de forma instantânea:

- Verde: Indica que os níveis de poluentes estão baixos e dentro dos parâmetros de segurança.
- Amarelo/Laranja: Indica um estado de "atenção", onde os níveis estão se aproximando dos limites recomendados, sugerindo que uma ação preventiva, como aumentar a ventilação, pode ser necessária.
- Vermelho: Indica que os níveis ultrapassaram os limites de segurança recomendados, sinalizando uma necessidade clara de ação para melhorar a qualidade do ar.

O objetivo desta metodologia visual não é informar o valor numérico exato, mas sim alertar o usuário sobre variações relativas significativas na concentração de poluentes. O foco está em capacitar o ocupante para a ação, transformando o dado do sensor, mesmo com suas incertezas inerentes, em uma ferramenta útil para a promoção de um ambiente interno mais saudável.

3.5 Cronograma

No Quadro 1 é mostrado o cronograma que planejamos para o desenvolvimento e conclusão do projeto.

Quadro 1 – Cronograma das atividades previstas 2025-2

| Etapas | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | ✓ | | | | | |
| 2 | | ✓ | | | | |
| 3 | | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| 4 | | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| 5 | | | ✓ | | ✓ | |
| 6 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 7 | | | | | | ✓ |
| 8 | | | | | | ✓ |

- **Etapa 1:** Apresentação da proposta para a banca examinadora;
- **Etapa 2:** Validar hardware atual e validação dos sensores;
- **Etapa 3:** Desenvolvimento do Servidor MQTT, implementação da tópicos no broker e o banco de dados;

- **Etapa 4:** Desenvolvimento do aplicativo, implementação da interface de comunicação com o Servidor;
- **Etapa 5:** Testes e validação das implementações;
- **Etapa 6:** Produção do documento final;
- **Etapa 7:** Preparação da apresentação;
- **Etapa 8:** Apresentação final.

REFERÊNCIAS

ALFANO, Brigida et al. A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives. **Annual Achievements Report Available Now**, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6819>>.

ANVISA. **Resolução RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003**. 2023. Disponível em: <<https://lamic.com.br/resolucao-re-no-9-de-16-de-janeiro-de-2003-anvisa/#:~:text=A%20RE%209%20estabelece%20os,instalados%20devem%20seguir%20a%20resolu%C3%A7%C3%A3o>>.

BOERSTRA, ATZE; RAUE, ARJEN; CHENG, LOUIE. Smart monitoring of building performance with IEQ sensor networks. **REHVA**, 20219. Disponível em: <<https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/smart-monitoring-of-building-performance-with-ieq-sensor-networks>>.

ESA, United States Environmental Protection Agency. **Heating, Ventilation and Air-Conditioning Systems, Part of Indoor Air Quality Design Tools for Schools**. 2023. Disponível em: <<https://www.epa.gov/iaq-schools/heating-ventilation-and-air-conditioning-systems-part-indoor-air-quality-design-tools>>.

GIORDANO, Michael R et al. A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives. **Aerosol Science**, 2021. Disponível em: <<https://hal.science/hal-03442005v1>>.

GONZALEZ-MARTÍN, Javier et al. A state-of-the-art review on indoor air pollution and strategies for indoor air pollution control. **Elsevier**, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/journal/chemosphere>>.

JIN, Shengjia et al. Indoor Volatile Organic Compounds: Concentration Characteristics and Health Risk Analysis on a University Campus. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1660-4601/20/10/5829>>.

KUHNEN, Felipe. **Indoor air quality monitoring and control system. Monography**. São José, Brazil, 2024.

MARQUES, Simone. **Aplicativos híbridos: tudo o que você precisa saber**. Dez. 2024. Disponível em: <<https://uds.com.br/blog/aplicativos-hibridos/>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

METELSKIY, Konstantin. **DEMAND CONTROLLED VENTILATION SYSTEMS**. 2011. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/38043008.pdf>>.

PRANAIR. **O que é Material Particulado (PM)?** 2025. Disponível em: <<https://www.pranaair.com/pt-pt/what-is-particulate-matter-pm/>>. Acesso em: 3 jul. 2025.

QIAN, Hua; ZHENG, Xiaohong. Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings. **Journal of Thoracic Disease**, v. 10, Suppl 19, 2018. ISSN 2077-6624. Disponível em: <<https://doi.org/10.21037/jtd.2018.01.24>>.

SALTHAMMER, Tunga. TVOC - Revisited. **Elsevier**, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412022003671?via%3Dihub>>.

SAUERMAN. **The dangers of VOCS: Formaldehyde (CH₂O)**. Abr. 2024. Disponível em: <<https://sauermanngroup.com/es-US/node/38142>>. Acesso em: 1 jul. 2025.

YUAN, Michael. **Conhecendo o MQTT**. Dez. 2021. Disponível em: <<https://developer.ibm.com/articles/iot-mqtt-why-good-for-iot/>>. Acesso em: 10 jul. 2025.