

UM SISTEMA PARA SONDAÇÃO AMBIENTAL E VERIFICAÇÃO DA
QUALIDADE DO AR

Iran de Alvarenga Cidade

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Diego Nunes Brandão

Co-orientador: João Roberto de Toledo Quadros

Um Sistema para sondagem ambiental e verificação da qualidade do ar

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre.

Iran de Alvarenga Cidade

Banca Examinadora:



Presidente, Professor D.Sc. Diego Nunes Brandão (CEFET/RJ)

Professora D.Sc. João Roberto de Toledo Quadros (CEFET/RJ)

Professor D.Sc. Eduardo Soares Ogasawara (CEFET/RJ)

Professor D.Sc. Jader Lugon Jr.(IFF)

Rio de Janeiro, Março de 2023

PÁGINA RESERVADA PARA A FICHA CARTOGRÁFICA

DEDICATÓRIA

Quero dedicar este trabalho a todos que me deram apoio em momentos difíceis que vivi durante a elaboração desta tese. Minha família que sempre me incentivou em todo tempo, em especial a Fabiana minha esposa, meus filhos: Maria Eduarda, Yan Pedro e Fabiane e a Deus! porque sem Ele nada podemos ser ou fazer.

AGRADECIMENTOS

..

Aos meus orientadores Prof. Diego Nunes Brandão e Prof. João Roberto de Toledo Quadros, pela dedicação incondicional no ensinamento, orientação, estímulo, amizade e total apoio em diversos momentos de dificuldades que encontrei no desenvolvimento desse projeto. Aos companheiros de curso, em que, nas disciplinas do programa e pesquisas, tive a oportunidade de conhecer e contar com o apoio, o prazer de poder compartilhar conhecimentos e relacionamento de amizade, especialmente a amiga Luciana Varjolo. Aos parceiros de voo de drone, Rene Nery e Leandro Cravo da escola “Ícarus”, minha eterna gratidão por possibilitarem a pesquisa suas experiências de voo com drones. A essas pessoas, ofereço minha eterna gratidão, pelo desenvolvimento e conclusão desse projeto de grande importância. À CAPES pelo apoio financeiro durante o mestrado.

RESUMO

Um Sistema para sondagem ambiental e verificação da qualidade do ar

Os avanços tecnológicos dos últimos anos vêm permitindo que diferentes áreas da ciência sejam beneficiadas e até revolucionadas, alguns exemplos podem ser vistos na utilização de técnicas de inteligência artificial em diagnósticos de doenças, na identificação de criminosos por imagem etc. A área ambiental também tem sido beneficiada com tais avanços, o uso de algoritmos de IA para o sensoriamento remoto e o de sensores para a determinação de poluição são só alguns dos exemplos. Neste contexto, este trabalho apresenta um sistema de monitoramento ambiental flexível que visa fornecer uma leitura rápida de elementos que poluem o ar e que podem comprometer a saúde humana. O sistema desenvolvido consiste no monitoramento de poluentes do ar por meio de sensores interligados a uma interface eletrônica embarcada em um Veículo Autônomo Não-Tripulado (VANT). Os dados capturados são analisados por meio de um algoritmo baseado em lógica fuzzy que permite definir os índices de qualidade do ar, de acordo com órgãos regulamentadores. Experimentos foram conduzidos em uma área industrial da cidade do Rio de Janeiro e os resultados demonstram a viabilidade da proposta.

Palavras-chave: Qualidade do Ar, Dispositivos Eletrônicos, Lógica Fuzzy

ABSTRACT

A System for Environmental Monitoring and Air Quality Verification

The technological advances in recent years have been allowing different areas of science to be benefited and even revolutionized; some examples can be seen in the use of artificial intelligence techniques in disease diagnosis and in identifying criminals by imaging, among others. The environmental area has also benefited from such advances; AI algorithms for remote sensing and sensors for pollution determination are just some examples. In this context, this work presents a flexible environmental monitoring system that aims to quickly read elements that pollute the air and can compromise human health. The system developed monitors air pollutants using sensors connected to an electronic interface on an autonomous unmanned vehicle (UAV). The captured data is analyzed by an algorithm based on fuzzy logic that allows the definition of air quality indices based on the regulatory agencies' criteria. Experiments were conducted in an industrial area of Rio de Janeiro, and the results demonstrate the proposal's feasibility.

Key-words: Air Quality, Electronic Devices, Fuzzy Logic

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Quantidade de artigos publicados sobre monitoramento de qualidade do ar utilizando VANTs entre 2014 e 2021 na base Scopus. | 12 |
| 4.1 | Modelo da arquitetura básica da plataforma de monitoramento da qualidade do ar, composta do VANT e da estação base, cada qual com suas características de hardware e software. (Fonte: O próprio autor). | 15 |
| 4.2 | Desenho da interface Arduino UNO R3, com microcontrolador ATMEGA328p (Fonte: [Fransiska et al., 2013]). | 17 |
| 4.3 | Sensor de identificação de CO ₂ , modelo MQ-135. (Fonte: Datasheet do MQ135) . . . | 17 |
| 4.4 | Sensor de umidade e temperatura, modelo DHT11. (Fonte Datasheet do DHT11) . . | 18 |
| 4.5 | Sensor de CO, modelo MQ-7. (Fonte: Datasheet da HUANWEI) | 18 |
| 4.6 | Diagrama do sensor PPD42NJ e foto do sensor. (Fonte: Datasheet do PD42NJ) . . . | 18 |
| 4.7 | Exemplo de operação do sensor PPD42NJ, com uma linha de pulso capturada (Fonte: Datasheet do PPD42NJ) | 19 |
| 4.8 | Exemplo de barômetro utilizado para medições de pressão atmosférica em Pascal BMP180. (Fonte: Datasheet do BMP180) | 19 |
| 4.9 | Dispositivo de armazenamento dos dados, no padrão micro SD. Fonte: [DATASHEET, 2018]. | 19 |
| 4.10 | Diagrama eletrônico do dispositivo desenvolvido, com as ligações entre o microcontrolador/interface Arduino R3 (com o ATMEGA328P) e os sensores, apresentando as pinagens entre eles. (Fonte: O próprio autor) | 20 |
| 4.11 | Dispositivo proposto para o monitoramento do ar. (Fonte: O próprio autor) | 21 |
| 4.12 | Dispositivo proposto associado ao VANT. (Fonte: O próprio autor) | 21 |
| 4.13 | Exemplo de funções de pertinência usadas no conjunto fuzzy. Fonte: Mathworks guide (MATLAB, 2021) | 23 |
| 4.14 | Etapas de um sistema fuzzy, com as entradas de dados em um fuzzyficador; a parte de inferência, na qual serão ativadas as regras conforme os dados numéricos extraídos, e o resultado sendo defuzzyficado em uma saída numérica. (Fonte: O próprio autor) | 24 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.15 | Modelo de entrada de dados de CO2 para o Controlador Mamdani que se utiliza de uma função de pertinência trapezoidal. (Fonte: O próprio autor) | 25 |
| 4.16 | Controlador Mamdani executando função de saída, determinando termos textuais, tais como, MBOA (Muito Boa), BOA, MEDIA, RUIM e MRUIM (Muito Ruim), aos valores numéricos encontrados. (Fonte: O próprio autor) | 26 |
| 4.17 | Exemplo de quadro com regras e os termos fuzzy associados às entradas numéricas do controlador Mamdani, definidos no ambiente do MATLAB, para análise de dados. (Fonte: O próprio autor) | 26 |
| 4.18 | Variáveis de entrada usando modelagem (JAVA). Relacionados termos linguísticos de entrada (PM10, PM2.5, CO e CO2), intervalos numéricos e termos linguísticos de saída (BOA e REGULAR). (Fonte: O próprio autor) | 28 |
| 4.19 | Arquitetura da Plataforma de Sensoriamento em execução (Fonte: O próprio autor) . | 28 |
| 5.1 | Representação geográfica das regiões monitoradas com o VANT na cidade do Rio de Janeiro. (Fonte: O próprio autor) | 31 |
| 5.2 | Sistema em NodeRed para validação do monitoramento em um ambiente Indoor em tempo real. (Fonte: O próprio autor) | 33 |
| 5.3 | Modelo de saída do tratamento estatístico realizado com Python sobre os dados capturados (representando o primeiro dataset da etapa de análise). (Fonte: o próprio autor) | 34 |
| 5.4 | Primeira representação de níveis de CO2 (a) e CO (b) do ambiente examinado, extraídos do dataset gerado pelo sistema em Python. (Fonte: o próprio autor) | 35 |
| 5.5 | Dados obtidos após a fase de pré-processamento. (Fonte: o próprio autor). | 35 |
| 5.6 | Exemplo de submissão dos dados medidos ao controlador Mamdani na aplicação MATLAB. (Fonte: o próprio autor) | 36 |
| 5.7 | Representação do código de entrada de dados para a biblioteca fuzzy em JAVA. (Fonte: o próprio autor) | 37 |
| 5.8 | Saída Fuzzy para controlador Mamdani da aplicação JAVA. (Fonte: o próprio autor) | 37 |
| 5.9 | Dados .csv da área do Recreio dos Bandeirantes/RJ após o pré-processamento. (Fonte: o próprio autor). | 41 |
| 5.10 | Saídas após fuzzificação dos dados obtidos pelas bibliotecas do MATLAB (a) e do JAVA (b) para a região do Recreio dos Bandeirantes/RJ. (Fonte: o próprio autor) . . | 41 |
| 5.11 | Indicativo de dispersão de CO2 pela pressão atmosférica na região do Recreio dos Bandeirantes/RJ. (Fonte: o próprio autor) | 41 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.12 | Dispersão de CO ₂ e PM _{2.5} (a) e CO ₂ e PM ₁₀ em vermelho, apresentando a baixa indicação de partículas na região do Recreio dos Bandeirantes/RJ (Fonte: o próprio autor). | 42 |
| 5.13 | Dados .csv da área de Santa Cruz/RJ após o pré-processamento. (Fonte: o próprio autor). | 43 |
| 5.14 | Saídas após fuzzyficação dos dados por meio das bibliotecas do MATLAB (a) e do JAVA (b) para a região de Santa Cruz/RJ. (Fonte: o próprio autor). | 43 |
| 5.15 | Dispersão de CO e Pressão atmosférica na região de Santa Cruz/RJ (Fonte: o próprio autor). | 43 |
| 5.16 | Dispersão de CO ₂ e Pressão atmosférica na região de Santa Cruz/RJ (Fonte: o próprio autor). | 44 |
| 5.17 | Concentração de CO ₂ com partículas em suspensão PM _{2.5} na região de Santa Cruz/RJ (Fonte: o próprio autor). | 44 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Tabela de concentração de monóxido de carbono de acordo com padrões nacionais e internacionais. Fonte: Ficha de Informação toxicológica [CETESB, 2020]. | 3 |
| 2.1 | Padrões das normas nacionais e internacionais utilizados para classificação da qualidade do ar. Fonte: Resolução CONAMA [CONAMA, 2018]. | 8 |
| 5.1 | Limites de entrada de conjuntos fuzzy de acordo com padrões das normas nacionais e internacionais. | 30 |
| 5.2 | Principais componentes eletrônicos utilizados nos ambiente avaliados e custo de cada um deles. | 32 |
| 5.3 | Características operacionais dos sensores. | 32 |
| 5.4 | Referências para defuzzificação do algoritmo fuzzy | 36 |
| 5.5 | Resultados da saída fuzzy com MATLAB e JAVA. | 38 |
| 5.6 | Comparação do sistema proposto com os dados fornecidos pela prefeitura do Rio de Janeiro por meio do portal JEAP ¹ | 39 |
| 5.7 | Voos realizados na região do Recreio dos Bandeirantes/RJ. (Fonte: Próprio autor) . | 40 |
| 5.8 | Monitoramentos realizados com VANT realizados em área de Santa-Cruz-RJ. (Fonte: Próprio autor) | 42 |

Lista de Abreviações

| | |
|--------|------------------------------------|
| CO | Monóxido De Carbono |
| CO2 | Dióxido De Carbono |
| CONAMA | Conselho Nacional Do Meio Ambiente |
| IA | Inteligência Artificial |
| INEA | Instituto Estadual Do Ambiente |
| OMS | Organização Mundial De Saúde |
| PM10 | Partículas Inaláveis |
| PM2.5 | Partículas Inaláveis Finas |
| PTS | Partículas Totais Em Suspensão |
| VANTS | Veículos Aéreos Não-Tripulados |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Justificativa para escolha do tema | 2 |
| 1.2 | Objetivos e estrutura | 4 |
| 1.2.1 | Estrutura do texto | 4 |
| 2 | Referencial teórico | 5 |
| 2.1 | Conceitos fundamentais | 5 |
| 2.2 | Sistemas inteligentes para monitorar a qualidade do ar | 8 |
| 2.3 | Considerações Complementares | 9 |
| 3 | Trabalhos Relacionados | 11 |
| 3.1 | Base de Dados e String de Busca | 11 |
| 3.2 | Trabalhos obtidos | 12 |
| 4 | Arquitetura, materiais e metodologia | 15 |
| 4.1 | Arquitetura Proposta | 15 |
| 4.1.1 | Aspectos sobre o VANT | 16 |
| 4.2 | O Dispositivo Desenvolvido | 17 |
| 4.2.1 | Diagrama do hardware acoplado ao VANT | 20 |
| 4.2.2 | Software do Dispositivo | 20 |
| 4.3 | Estação Base | 21 |
| 4.3.1 | Aspectos básicos sobre lógica fuzzy | 22 |
| 4.3.2 | Abordagens de lógica fuzzy | 24 |
| 4.4 | Integração do sistema de sensoriamento | 28 |
| 5 | Resultados e Discussão | 29 |
| 5.1 | Definições de Configurações para os Testes | 29 |
| 5.1.1 | Configurações do VANT e da Estação-Base | 29 |
| 5.1.2 | Tabela de dados a ser considerada para a análise | 30 |
| 5.2 | Ambiente Escolhido para o Monitoramento | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3 | Validação dos Sensores | 31 |
| 5.4 | Preparação e tratamento dos dados | 33 |
| 5.5 | Aplicação das técnicas fuzzy | 36 |
| 5.5.1 | Abordagem com a biblioteca fuzzy do MATLAB | 36 |
| 5.5.2 | Abordagem com a biblioteca fuzzy do JAVA | 37 |
| 5.6 | Validação do dispositivo | 39 |
| 5.7 | Análise e Discussão sobre os Resultados | 40 |
| 5.7.1 | Análise sobre o ambiente Recreio dos Bandeirantes-RJ | 40 |
| 5.7.2 | Análise sobre o ambiente Santa Cruz-RJ | 42 |
| 6 | Considerações finais e trabalhos futuros | 45 |
| 6.1 | Trabalhos Futuros | 46 |
| | Referências Bibliográficas | 47 |

Capítulo 1

Introdução

O cenário atual do meio ambiente demonstra que o crescimento populacional em centros urbanos tem afetado a qualidade do ar significativamente [Zhang et al., 2022]. Com a exposição a poluentes oriundos de fábricas e veículos automotores, o número de casos de doenças respiratórias em seres humanos tem sido cada vez maior [Arias-Pérez et al., 2020]. Dados internacionais mostram que 8 milhões de pessoas são levadas a óbito devido à poluição do ar [Wellenius et al., 2015]. A contaminação por poluentes atmosféricos também pode ser encontrada na base de dados da Organização Mundial de Saúde (OMS). O banco de dados foi lançado em abril de 2022 e atualmente hospeda dados sobre a qualidade do ar em mais de 6.000 assentamentos humanos em mais de 100 países. Ocorrem 7 milhões de mortes prematuras ao ano em função da poluição do ar no mundo 800 pessoas por hora [WHO, 2021].

Os principais responsáveis por esse aumento no número de casos de doenças respiratórias são os gases Monóxido de Carbono (CO) (monóxido de carbono) e Dióxido de Carbono (CO₂) (dióxido de carbono), gerados pela queima de combustíveis fósseis como o carvão [Marques et al., 2020]. Monitorar a quantidade desses e de outros gases não só na atmosfera, mas em todos os ambientes com presença de vida, tornou-se uma tarefa essencial para a saúde humana em grandes cidades como São Paulo, Tóquio, Beijing e etc. [Freitas et al., 2005].

Com o advento tecnológico dos últimos anos, a tarefa de monitorar o meio ambiente vem se popularizando por meio de interfaces eletrônicas, como a interface Arduino, que permitem a criação de centrais de monitoramento da qualidade do ar com um custo bem reduzido [Schirmer and Gauer, 2012; Fadzly et al., 2020]. Aliado a tais interfaces, o desenvolvimento de sensores e o avanço das técnicas de Inteligência Artificial (Inteligência Artificial (IA)) para análise de dados permitem uma melhor fiscalização e compreensão do problema [Villa et al., 2016].

Diversas abordagens têm sido propostas para o monitoramento da qualidade do ar, tanto em aplicações para áreas rurais [da Paixão and da Silva, 2021], quanto para ambientes urbanos [Albino et al., 2015]. Dentre as abordagens possíveis, destacam-se os sistemas de monitoramento fixos e os móveis. Os sistemas fixos são constituídos por redes de sensores que, apesar de permitirem o monitoramento constante, sofrem com restrições geográficas, exigindo a intervenção humana no local

para instalação e manutenção [Arias-Pérez et al., 2020]. Já o monitoramento móvel pode utilizar-se de Veículos Aéreos Não-Tripulados (Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs) ou drones), que permitem alcançar locais de difícil acesso, mas com a desvantagem de efetuarem um monitoramento esporádico [Fadzly et al., 2020].

Ambos os sistemas utilizam sondas e equipamentos eletrônicos para a percepção de partículas ou parâmetros ambientais primordiais. Além de dispositivos para o armazenamento dos dados e para a comunicação (wi-fi, bluetooth, lora etc) [Angrisani et al., 2019]. Diversos sensores podem ser acoplados em tais sistemas, partículas suspensas no ar, temperatura, umidade e pressão atmosférica, são só alguns exemplos de parâmetros que podem ser monitorados. Todos esses dados podem ser utilizados em modelos matemáticos/estatísticos para se obter uma melhor descrição e classificação da qualidade do ar de uma região, de acordo com as determinações dos órgãos responsáveis pelo monitoramento [Marques et al., 2020].

No contexto brasileiro, os níveis de qualidade do ar são determinados pela Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) N. 491/18 [CONAMA, 2018]. Essa regulamentação define os parâmetros a serem monitorados, tais como os níveis das partículas totais em suspensão (partículas totais em suspensão (PTS)), das partículas inaláveis (Partículas Inaláveis (PM10) e Partículas Inaláveis Finas (PM2.5)), do dióxido de enxofre (SO₂), do dióxido de carbono (CO₂), do monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂) e das partículas de chumbo (Pb).

Assim, além do monitoramento quantitativo dos parâmetros do ar por meio dos sensores, é interessante que tais dados sejam qualificados de acordo com as resoluções vigentes. Tais características demonstram que apesar da importância do monitoramento da qualidade do ar para toda a sociedade, ele ainda é um desafio. Pois além dos custos dos equipamentos a serem utilizados, requer inúmeros parâmetros a serem observados e métodos que permitam comparar os dados obtidos com os modelos de qualidade descritos pelas resoluções vigentes.

Esse trabalho aborda exatamente este contexto, o desenvolvimento de dispositivos de monitoramento ambiental de baixo custo para efetuar análise e qualificação do ar de centros urbanos. Além disso, um sistema que utiliza técnicas de lógica fuzzy foi desenvolvido, visando comparar os dados obtidos pelos sensores com aqueles de protocolos de monitoramento ambiental oficiais.

1.1 Justificativa para escolha do tema

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), a qualidade do ar é um dos maiores riscos à saúde pública atual. As diretrizes para essa conclusão fazem parte de uma base de dados e conhecimentos científicos acumulados, com caráter preventivo ou de recomendações, descritas pela OMS em documento oficial [WHO, 2021].

Dependendo das partículas encontradas, os efeitos sobre a saúde humana podem ser bem dano-

Tabela 1.1: Tabela de concentração de monóxido de carbono de acordo com padrões nacionais e internacionais. Fonte: Ficha de Informação toxicológica [CETESB, 2020].

| Meio | Concentração | Tempo de Medição | Referência |
|------|--------------|---|----------------|
| Ar | 90 ppm | Valor Orientador - 15 min | [WHO, 2021] |
| | 50 ppm | Valor Orientador - 30 min | |
| | 25 ppm | Valor Orientador - 1 hora | |
| | 10 ppm | Valor Orientador - 8 horas | |
| Ar | 9 ppm | Padrão primário e secundário - 8 horas* | [CONAMA, 1990] |
| | | Padrão primário e secundário - 1 hora* | |
| | 35 ppm | Padrão primário e secundário - 8 horas* | |
| | | Padrão primário e secundário - 1 hora* | |

tos. No caso de análise de monóxido de carbono (CO), por exemplo, níveis elevados podem provocar casos de parada respiratória [Wu et al., 2018].

Em relação ao dióxido de carbono (CO₂), a análise das concentrações deste gás em áreas industriais, assim como as que contenham termoelétricas funcionando com queima de carvão, tem como propósito verificar se o valor encontrado excede o tolerável para manutenção da saúde respiratória de um ser humano, tendo em vista que nessas áreas podem existir habitações [Wu et al., 2018].

O acúmulo na atmosfera da concentração de CO₂ impede que a radiação solar, refratada pela Terra, escape da atmosfera, provocando o que se chama de “Efeito Estufa” [Pires, 2005]. Além disso, os aumentos da concentração desse gás, em conjunto com o aumento da temperatura, afetam processos de fotossíntese e respiração das plantas, atuando contra a produção agrícola [Dutra Fagundes et al., 2010].

Ainda em relação ao CO, existem também os padrões Instituto Estadual do Ambiente (INEA) [Dutra Fagundes et al., 2010], nos quais se indica se ele é oriundo de fontes naturais (atividade vulcânica, descargas elétricas e emissão de gás natural) ou como produto da combustão incompleta de combustíveis fósseis, de sistemas de aquecimento e de usinas termelétricas. Dentro destes padrões, indica-se que, no caso do CO, cerca de 80-90% dele é absorvido pelo organismo, ocorrendo uma ligação com a hemoglobina que forma a carboxi-hemoglobina (COHb). A afinidade da hemoglobina para com o monóxido de carbono é de 200-250 vezes maior que o oxigênio [CETESB, 2020], sendo importante, levar essas partículas em consideração, pois seu excesso pode levar a óbito.

Na Tabela 1.1, podem ser vistos os valores associados às principais partículas atmosféricas utilizadas para avaliação e qualificação das condições atmosféricas, compondo os padrões definidos por órgãos regulamentadores nacionais (CONAMA e INEA) e internacionais (OMS). A partir destes padrões, pode-se classificar as condições atmosféricas do ambiente.

Assim, o desenvolvimento de recursos flexíveis e de baixo custo associados com algoritmos de IA, para analisar, classificar e categorizar o nível de poluentes atmosféricos em ambientes diversos torna-se importante para mitigar os efeitos de poluentes na saúde humana, principalmente com o

quadro atual de urbanização e constante crescimento de áreas industriais.

1.2 Objetivos e estrutura

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um sistema que possa ser integrado em diferentes veículos aéreos não-tripulados (VANTs) , isto é, um sistema flexível e de baixo custo para monitorar e analisar dados para classificação de parâmetros atmosféricos, visando determinar índices de qualificação do ar. A finalidade desse sistema é monitorar o gradiente espacial de algumas variáveis atmosféricas, associado a um algoritmo de IA para classificação dos dados obtidos. Os dados medidos são o monóxido de carbono, dióxido de carbono, temperatura, umidade, pressão atmosférica e material particulado em suspensão.

Além do objetivo principal, este trabalho tem como objetivos secundários:

- Realizar uma revisão de trabalhos da literatura que abordem sobre dispositivos de baixo custo capazes de detectar gases presentes na atmosfera, bem como, partículas em suspensão, para caracterização da qualidade do ar e que funcionem acoplados a VANTs;
- Comparar diferentes bibliotecas de lógica fuzzy na avaliação dos dados para determinação da qualidade do ar;
- Apresentar uma metodologia para classificar e validar os dados obtidos de modo a facilitar a classificação e a medição da qualidade do ar;
- Avaliar a qualidade do ar em duas regiões da cidade do Rio de Janeiro, a saber uma região industrial (Santa Cruz) e outra não industrial (Recreio dos Bandeirantes).

1.2.1 Estrutura do texto

Este trabalho está dividido em mais 5 capítulos. A fundamentação teórica ou delimitação do domínio do problema é apresentada no Capítulo 2. Uma breve revisão dos artigos encontrados sobre o tema nas referências bibliográficas é apresentada no Capítulo 3. Toda a metodologia desenvolvida neste trabalho é descrita no Capítulo 4. Já a apresentação das áreas de estudo, bem como uma discussão sobre os resultados obtidos pela metodologia empregada são descritas no Capítulo 5. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e possíveis continuações para o presente trabalho.

Capítulo 2

Referencial teórico

O problema de qualificar o ar sofre influência do ambiente e de quais parâmetros devem ser avaliados. Para padronizar o que deve ser avaliado, existem normas e regras definidas por órgãos de saúde e/ou meio ambiente. Esse capítulo apresenta uma breve discussão sobre os parâmetros que foram avaliados, bem como as normas utilizadas no contexto da solução abordada.

2.1 Conceitos fundamentais

Para haver uma acurada análise e classificação dos dados de um sensoriamento atmosférico, faz-se importante delimitar os conceitos que devem ser considerados e associados a esta ação de monitorar o ar. Entre estes conceitos, existe a definição de poluição atmosférica que pode ser resumida como a presença de substâncias estranhas na atmosfera, resultantes da atividade humana ou de alguns processos naturais com concentrações suficientes para interferir direta ou indiretamente na saúde, segurança e bem-estar dos seres vivos [Pires, 2005].

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados como sólidos, líquidos ou gasosos, de acordo com seu estado de agregação. A análise de dados atmosféricos pode fazer uso de combinações desses três tipos de elementos/grupos. Por exemplo, substâncias sólidas ou líquidas podem ser agrupadas como particulados ou materiais particulados.

Os gases e vapores são poluentes moleculares com existência permanente no ar, sendo que os gases propriamente ditos são vapores que, à temperatura ambiente, podem sofrer condensação e voltar à forma líquida original [Boubel et al., 2013].

Um poluente pode ter diversas origens, nomeadas “fontes”. Estas fontes podem se constituir em emissões diretas na atmosfera e podem ser de origem natural ou antropogênica. Para Pires [2005], a fonte de poluição é um conceito amplo que pode ser definido como:

- Um local do qual escapam substâncias poluentes (chaminés, dutos, descargas de ar etc.);
- Processos ou equipamentos de produção (caldeiras, fornos, linhas de produção, câmaras de combustão etc.);

- Uma área ou conjunto de pontos ou processos e equipamentos numa região específica, capazes de liberar matéria ou energia para a atmosfera, tornando-a poluída.

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente [CONAMA, 1990], fontes de emissão, ou somente fontes, são quaisquer processos ou atividades que liberam poluentes para a atmosfera. Entre as fontes de poluição atmosférica, definidas dentro do padrão nacional do CONAMA e do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) [INEA, 2021], tem-se:

- Fontes Estacionárias ou Fontes Fixas: oriundas das queimadas, processos industriais, queima de combustível em padarias, lavanderias etc.;
- oriundas dos meios de transporte terrestre, aéreo e marítimo; e
- Fontes Naturais: oriundas de processos naturais de emissão que ocorreram ou ocorrem durante os milhares de anos como as atividades vulcânicas, tempestades, liberação de hidrocarbonetos pelas plantas, ação eólica, entre outras.

Para efeitos de análise em geral, define-se os padrões de qualidade do ar dividindo-os em primários e secundários [CONAMA, 2018]. Os padrões primários ocorrem quando a concentração de poluentes pode afetar a saúde da população, quando se ultrapassa limites associados ao ambiente analisado.

Já os padrões secundários são aqueles que aparecem com concentração média anual de cem microgramas por metro cúbico de ar. Eles determinam as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Os dados referentes a esses padrões, categorizados pelo CONAMA N. 491 de 19/11/2018 [CONAMA, 2018] podem ser vistos na Tabela 2.1.

Considerando todas as variáveis vistas nos diversos documentos regulatórios, foram separadas, para o escopo deste trabalho, aquelas que estão de acordo com os padrões do CONAMA e INEA, sendo os parâmetros e definições de partículas comumente utilizados em trabalhos de análise e qualificação do ar [CONAMA, 2018]. Entre elas, estão:

- Material Particulado PM₁₀ e PM_{2.5}: partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 10 e 2,5 μm ;
- Concentração dos poluentes atmosféricos: utiliza como grandeza o micrograma por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), com exceção do Monóxido de Carbono (CO) que é reportado como partes por milhão (ppm);

- Nível de dióxido de carbono (CO_2): não está relacionado diretamente aos poluentes de alerta à saúde, mas contribui indiretamente através de alterações climáticas devido a altas concentrações, também medido em ppm. Pelo padrão LEED [USGBC, 2021], considera-se aceitável para CO_2 , em ambiente fechado ventilado, uma distribuição de partículas igual a 75ppm e, em ambiente aberto, até 530ppm;
- O nível de CO_2 também é alterado em função de rápidas transformações no ambiente terrestre oriunda de ação antrópica. Esse nível passou de 280ppm para 383ppm em 200 anos e, atualmente, este valor de 383ppm está aumentando, principalmente pelo acúmulo de CO_2 . O excedente deste gás não pode ser absorvido pelos reservatórios naturais de carbono, como os oceanos e as florestas. Os limites para emissão de gases nas atmosferas são chamados limites planetários [SODRÉ et al., 2016];
- Temperatura e umidade: sendo a temperatura medida em graus Celsius(C) e a umidade relativa em UR [INEA, 2021];
- Pressão atmosférica: medida em PASCAL (PA);
- Índice de Qualidade do Ar ou (IQAr): é uma medida sem grandeza específica, mas aplicada para indicar a conformação da análise do ar dentro de critérios associados à saúde humana.

Outro conceito a ser visto para análises é o de biomassa que é a utilização da queima de material orgânico no processo de produção de energia elétrica. A biomassa pode ser produzida e acumulada em ecossistemas diversos [Sakhvidi et al., 2020], sendo que, na atmosfera, um composto oriundo desta biomassa pode sofrer oxidação por radicais livres, aumentando ainda mais a concentração de CO_2 nesse ecossistema [INEA, 2021].

Os parâmetros de temperatura e umidade são correlacionados aos processos de causa e efeito da emissão de gases poluentes e partículas em suspensão, tendo em vista que a análise do gradiente térmico é utilizada para traçar perfis de dispersão de CO bem como de CO_2 .

A pressão atmosférica também pode ser útil para elaborar perfis com relação a altitude, para gerar outros gráficos de dispersão e acúmulo de concentração de gases em conjunto com a influência do gradiente térmico.

O IQAr fornecerá ao público-alvo o entendimento sobre a qualidade do ar local, em relação a diversos poluentes atmosféricos, que serão mostrados no equipamento de monitoramento. Esse índice deve ser divulgado diariamente através de boletins de qualidade do ar [do Rio de Janeiro, 2022]. O IAQ é um índice disponível nas principais cidades do mundo em [Project, 2021]. O IAQ será utilizado como base de referência na amostra de dados realizada pela sondagem com o VANT.

Tabela 2.1: Padrões das normas nacionais e internacionais utilizados para classificação da qualidade do ar. Fonte: Resolução CONAMA [CONAMA, 2018].

| POLUENTE | TEMPO DE AMOSTRAGEM | PADRÃO PRIMÁRIO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹ | PADRÃO SECUNDÁRIO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹ |
|--------------------------------|----------------------------|---|---|
| Partículas Totais em Suspensão | 24 horas ² | 240 | 150 |
| | MGA ³ | 80 | 60 |
| Dióxido de Enxofre | 24 horas ² | 365 | 100 |
| | MAA ⁴ | 80 | 40 |
| Monóxido de Carbono | 1 hora ² | 40.000(35ppm) | 40.000(35ppm) |
| | 8 horas ⁵ | 10.000(9ppm) | 10.000(9ppm) |
| Ozônio | 1 hora ² | 140 | 130 |
| Fumaça | 24 horas ² | 120 | 100 |
| | MAA ⁴ | 60 | 40 |
| Partículas Inaláveis | 24 horas ² | 150 | 150 |
| | MAA ⁴ | 50 | 50 |
| Dióxido de Nitrogênio | 1 hora ² | 320 | 190 |
| | MAA ⁴ | 100 | 100 |

Por intermédio desse índice, pretende-se também validar discrepâncias nos sensores do VANT.

2.2 Sistemas inteligentes para monitorar a qualidade do ar

Faz-se mister aplicar conceitos de IA ao sensoriamento remoto, tendo em vista que o estudo será realizado em diferentes ambientes, classificando-o de acordo com a presença de partículas e percentual contido, levando-se em conta todas os parâmetros definidos e delimitados na Seção 2.1.

Considerando que a proposta consiste no uso de uma plataforma de sensoriamento móvel acoplada em um VANT, parâmetros como altitude, formatação embarcada dos controles, utilização de interfaces de baixo custo como o Arduino [Abraham and Li, 2016], sensores e softwares desenvolvidos para obtenção e tratamento de dados, também serão pontos de análise para melhorar a acurácia da classificação da qualidade do ar [Lee et al., 2020].

A classificação dos parâmetros descritos na Seção 2.1 é realizada através da coleta por equipamentos de monitoramento atmosférico. Já os algoritmos que empregam lógica nebulosa ou fuzzy servem para acurar o tratamento dos dados incompletos e ambíguos que podem surgir no momento

¹A condição de referência para concentração é de 25°C e pressão de 760mmHg.

²Não deve exceder mais que uma vez ao ano.

³Média Geométrica Anual (MGA)

⁴Média Aritmética Anual (MAA)

⁵Máxima Móvel obtida no dia.

das medições. Para isso, desenvolvem-se relações entre os dados obtidos e as funções matemáticas-estatísticas que são inseridas nos algoritmos de tratamento da informação [Xu et al., 2021].

Tal abordagem é executada com o propósito de fornecer mais precisão às informações e para dar acurácia à classificação dos resultados dentro de faixas de segurança com a classificação dentro dos seguintes critérios [CONAMA, 2018]:

- impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- inconveniente ao bem-estar público;
- danoso aos materiais, à fauna e flora; e
- prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade, e às atividades normais da comunidade.

2.3 Considerações Complementares

Uma questão incluída neste trabalho é verificar o quão baixo custo pode ser o desenvolvimento do sistema proposto, desde seu hardware e software, para que seja uma plataforma de monitoramento atmosférico eficiente e eficaz, capaz de obter uma avaliação da qualidade do ar criteriosa, com base nos padrões definidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente [CONAMA, 1990, 2018]. Além disso, a questão da calibração de tais sistemas também precisa ser observada, pois com o decorrer do tempo os sensores perdem a capacidade de realizar medições precisas.

Destacam-se as características móveis dessa plataforma (uso do VANT) e das montagens de sensores embarcados para que o recurso de monitoramento possa realizar sondagens do ambiente em locais de difícil acesso, nos quais existe poluição aparente, mas que precisam de dados para comprovar o tipo de gases poluentes atmosféricos existentes. Ademais, a estrutura aerodinâmica do VANT favorece a captação de gases e partículas, como ocorre em equipamentos de amostragem onde o ar é bombeado, pois o fluxo de ar fornecido pelas hélices do VANT é direcionado para os sensores, como visto em [Villa et al., 2016]. Cabe salientar, que o dispositivo proposto pode ser instalado em uma base fixa desde que observada as condições de ventilação favoráveis a captação dos gases.

O crescimento tecnológico e a praticidade de implementar interfaces eletrônicas de baixo custo é um incentivo ao desenvolvimento de tais recursos, sobretudo na qualidade, desempenho e robustez dos atuais controladores e dispositivos embarcados [Al Tahtawi et al., 2019].

Como visto em [Ciani et al., 2021], o controle atmosférico em zonas urbanas e rurais é um importante elemento para melhorar a qualidade de vida de pessoas que residam próximas de centros fabris de alta ou média produção.

Destaca-se que, neste trabalho, buscou-se fazer as medições em áreas mais críticas e desfavorecidas, tanto por falta de informação, quanto por falta de iniciativa e fomentos de projetos governamentais de qualidade de vida.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os trabalhos encontrados na literatura sobre dispositivos para monitoramento da qualidade do ar acoplados a VANTS, apresentando a string de busca utilizada, a base de dados escolhida e os refinamentos realizados para se definir os trabalhos mais aderentes a presente proposta. Uma busca sobre trabalhos similares no contexto brasileiro também foi realizada e os artigos são apresentados a seguir.

3.1 Base de Dados e String de Busca

Nos últimos anos inúmeros trabalhos foram desenvolvidos associando VANTs e dispositivos de baixo custo para monitoramento da concentração de poluentes [Ramanathan, 2006; Watai et al., 2006; Ramana et al., 2007; Corrigan et al., 2008; Villa et al., 2016; Fladeland et al., 2011; Mayer et al., 2012; Reuder et al., 2012; Berman et al., 2012; Lawrence and Balsley, 2013; Šmídl and Hofman, 2013; Illingworth et al., 2014; Altstädter et al., 2015; Brady et al., 2016; Alvear et al., 2017; Babaan et al., 2018; Chang et al., 2018; Chiliński et al., 2018; Gu et al., 2018; Lin et al., 2018; Ruiz-Jimenez et al., 2019]. A quantidade significativa de trabalhos nesta área tornou necessária uma revisão bibliográfica com um delineamento específico para identificar os trabalhos relacionados a esta dissertação.

A revisão bibliográfica foi realizada a partir de artigos da base de dados Scopus publicados no período de 2014 até 2021 obtidos com a seguinte string de busca: TITLE-ABS-KEY(("uav" OR "drone") AND ("pollution" OR "air quality" OR "air qualification")). Nesta busca inicial foram obtidos um total de 851 artigos. A Figura 1 ilustra o crescimento do número de publicações na área, demonstrando o crescimento no interesse de cientistas e pesquisadores por ela. Como o principal objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema utilizando uma plataforma de baixo custo que permita a sua reprodução de maneira simples, optou-se por acrescentar a palavra-chave Arduino a string de busca, resultando na string utilizada: TITLE-ABS-KEY(("uav" OR "drone") AND ("pollution" OR "air quality" OR "air qualification") AND ("arduino")). Como resultado foram obtidos 7 artigos que são discutidos a seguir. A partir destes artigos iniciais foram adicionados

quatro artigos usando a técnica de snowballing.

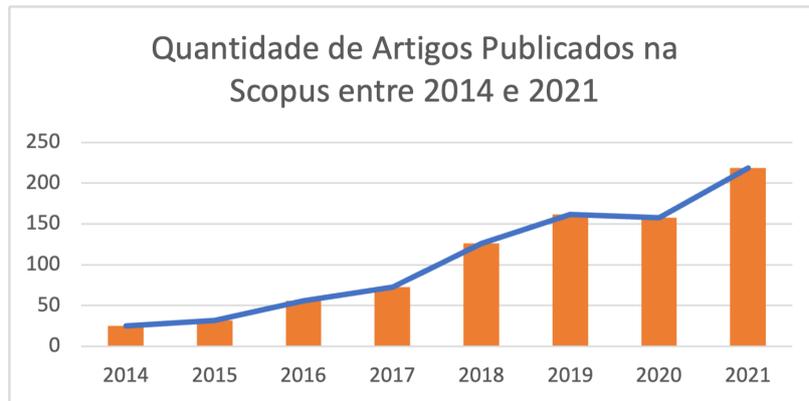


Figura 3.1: Quantidade de artigos publicados sobre monitoramento de qualidade do ar utilizando VANTs entre 2014 e 2021 na base Scopus.

3.2 Trabalhos obtidos

Conforme mencionado, a presença de veículos aéreos na área científica e comercial tem sido cada vez mais frequente [Sokač et al., 2016]. Esse aumento deve-se principalmente a redução dos custos de tais equipamentos, principalmente com o advento de interfaces como o Arduino. No contexto ambiental, a utilização de VANTS tem sido importante principalmente por permitir a sondagem em áreas inóspitas aos seres humanos.

Um dos primeiros trabalhos encontrados sobre o monitoramento da qualidade do ar associando VANTs e dispositivos de baixo custo com o Arduino foi o de [Sokač et al., 2016]. Naquele trabalho os autores avaliaram as concentrações de gases CO₂ e O₂ em diferentes níveis de altitude, mostrando a viabilidade de realizar tais medições com equipamentos de baixo custo, contudo nenhum tratamento dos dados coletados foi apresentado, visando a redução da imprecisão devido a coleta ou dados faltantes. Outro ponto a ressaltar é que nenhuma descrição sobre a classificação das medições em relação a qualidade do ar foi apresentada.

Já Ya'acob et al. [2017] acrescentam ao sistema de coleta de dados do VANT um sistema web para visualização dos dados monitorados. Os autores focaram em monitorar a temperatura, a umidade e a presença de monóxido de carbono no ar, todavia novamente nenhuma técnica para o desenvolvimento abordagens para tratamento da imprecisão dos dados ou para qualificação das medições foi apresentada.

Já Ángel et al. [2019] monitoram materiais particulados, especificamente PM₁₀, além da umidade e temperatura. Os autores utilizam o VANT com Arduino para coletar dados dentro do campus da Universidade del Atlántico na Colômbia. Outra característica interessante do trabalho foi a utilização de um equipamento profissional de monitoramento ambiental, permitindo aos autores compararem os resultados obtidos pelos sensores de baixo custo com os obtidos pelo sensor

profissional. Os autores mostraram que os resultados eram comparáveis quando utilizado um tempo de amostragem baixo, em torno de 15 minutos, o que possivelmente minimizava os erros de precisão dos equipamentos mais simples.

A interface Arduino Mega 2506 com sensores MQ-7(sensor de CO), MQ131(sensor de ozônio), PPD42NS (partículas em suspensão), e DHT22 (sensor de umidade e temperatura) é utilizada por [Zareb et al., 2021]. Os autores apresentam a concentração de tais propriedades do ar em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ monitorados em uma área urbana na Argélia. Para fins de comparação, os autores realizam medições em locais com presença de vegetação nesta área urbana e concluem que os níveis de gases estavam acima do ideal nas áreas com menor presença da vegetação.

No trabalho de [Liu et al., 2021], os autores utilizam o VANT para detectar vazamentos de gás metano (CH_4) provenientes de estações de exploração de gás natural em reservas de petróleo. Os autores avaliaram regiões localizadas no estado de Dakota do Norte nos Estados Unidos. Além do metano os autores monitoraram temperatura e umidade na região, eles conseguiram desenvolver um mapa de dispersão do gás metano, inclusive identificando uma distribuição heterogênea do gás na região. Os autores utilizaram uma arquitetura de redes sem fio baseada em um protocolo de comunicação LoRaWan [Thu et al., 2018]. Não fica claro se abordagens de tratamento para imprecisão dos dados foram utilizadas.

Já Montoya et al. [2020] realizaram o monitoramento de qualidade do ar em um aterro sanitário na Suécia. Eles conseguiram identificar a emissão de gases como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), gases que comprometem significativamente a qualidade do ar. A comunicação era realizada por meio do protocolo ZigBee [Beltran et al., 2020], com os dados sendo enviados do VANT para uma estação base, onde eram visualizados em tempo real. Os autores apresentaram uma abordagem interessante para conversão dos valores relativos de concentração de gases para o valor absoluto de concentração em partes por milhão. Eles também desenvolveram um algoritmo para evitar valores ausentes dos dados coletados e apresentaram uma análise de sensibilidade dos sensores utilizados. No entanto, também não apresentaram um sistema classificatório para descrever a qualidade do ar a partir dos gases monitorados.

Vijayakumar et al. [2020] foram os primeiros autores a indicar o interesse em determinar um índice para a qualidade do ar em áreas rurais, especificamente em regiões rurais da Índia. No entanto, o que os autores chamam de índice consiste em determinar as concentrações dos gases (H_2 , CO_2 , C_3H_8 , CH_4 e C_4H_{10}) e exibir esses valores similarmente aos artigos citados até aqui, nenhum tratamento definindo classes de qualidade do ar foi apresentado.

Rohi et al. [2020] propõem a utilização de VANT para reduzir a poluição do ar em regiões por meio de processos de reações químicas. O VANT apresentado pelos autores possui um tanque contendo uma solução de H_2O_2 e HNO_3 , estes são borrifados no ambiente sempre que os sensores

de NO₂ do VANT identificam que naquela região o valor do gás está elevado, com isso as moléculas reagem produzindo novos componentes menos prejudiciais ao ar. Os autores alertam sobre a possibilidade destas reações gerarem alguma modificação do pH do ambiente acarretando uma precipitação com acidez mais elevada.

Apesar de não ter utilizado o Arduino, Yadav et al. [2020] apresentam um sistema baseado em VANT também de baixo custo para monitoramento de qualidade do ar, avaliando as partículas em suspensão (PM₁₀ e PM_{2.5}). Os autores optaram pelo Raspberry Pi pois desenvolveram também o drone, visando avaliar a quantidade de energia solar necessária para ter o sistema constantemente em funcionamento.

O trabalho desenvolvido por [Jumaah et al., 2021] utilizou um VANT para a detecção de partículas (PM_{2.5}), temperatura e umidade em uma universidade na Malásia. Os autores avaliaram a presença do material particulado em diferentes níveis de altura e compararam com dados fornecidos pela NASA. Os dados eram coletados com o VANT e armazenados em cartão de memória para serem analisados posteriormente, os autores inclusive sugerem como trabalho futuro a integração do sistema com tecnologias de comunicação do tipo 4G/5G.

Liu et al. [2021] propõem a criação de um sistema global de monitoramento de qualidade do ar. O sistema proposto pelos autores integraria dados de diferentes estações de monitoramento e utilizaria uma técnica de aprendizado profundo para descrever um mapa de dispersão de gases, determinando assim a qualidade do ar de toda uma região. Os autores propõem utilizar um enxame de VANTs que enviariam os dados para um sistema central responsável pelo modelo baseado em uma rede neural convolucional de grafos, especificamente a Graph Convolutional Neural Network-based Long Short-Term Memory (GC-LSTM). No entanto, o sistema utilizado não é baseado em Arduino, mas a proposta é uma arquitetura que permitiria agregar sistemas de baixo custo, o que incluiria o Arduino.

Como pode ser observado, o interesse no monitoramento da qualidade do ar com dispositivos de baixo custo associados ao uso de VANTs é crescente. Assim, o ineditismo desta proposta consiste na quantidade de parâmetros avaliados associado ao desenvolvimento de um sistema de software baseado em lógica fuzzy que ao invés de apresentar somente a concentração dos poluentes, como os trabalhos da bibliografia, apresenta um mapeamento das situações de poluição de acordo com as faixas já padronizados pelo CONAMA [CONAMA, 1990]. Além disso, essa modelagem permite a construção de um processo, de modo a apresentar resultados com ações a serem tomadas, em relação ao ambiente medido, tais como: evitar exposição humana, exposição humana em risco, ou adequado ao ser humano, para mostrar uma área e a sua relação com a saúde humana [Simões and Shaw, 2007]. Por fim, outra contribuição consiste na avaliação realizada em uma região industrial da cidade do Rio de Janeiro/BR.

Capítulo 4

Arquitetura, materiais e metodologia

Este capítulo apresenta a proposta da arquitetura do sistema, os materiais empregados no desenvolvimento do dispositivo, entre hardware e software, e a metodologia utilizada. A descrição metodológica apresenta o processo de desenvolvimento do hardware e software, a integração e concepção da plataforma completa. Por fim, este capítulo ainda descreve o ambiente de testes, indicando o que foi testado, como foi testado e onde foi testada a plataforma desenvolvida.

4.1 Arquitetura Proposta

A Figura 4.1 apresenta o modelo da arquitetura básica proposta. Ela é composta por um VANT, constituído por um controlador e um gerenciador de voo, além do dispositivo desenvolvido nesta dissertação para o monitoramento do ar. Acrescenta-se um software embarcado no dispositivo para realizar o primeiro tratamento dos dados, que consiste em um pré-processamento e preparação dos dados. Por fim, a arquitetura apresenta a denominada Estação Base, nela os dados são analisados utilizando algoritmos de Ciência de Dados, no caso desta dissertação, um algoritmo baseado em lógica fuzzy.

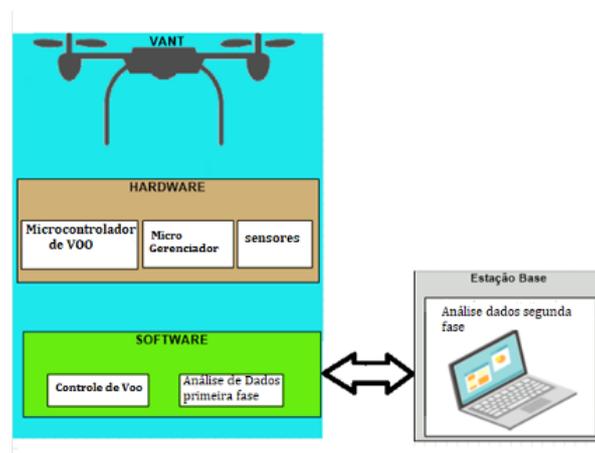


Figura 4.1: Modelo da arquitetura básica da plataforma de monitoramento da qualidade do ar, composta do VANT e da estação base, cada qual com suas características de hardware e software. (Fonte: O próprio autor).

Neste trabalho foi utilizado um VANT comercial, assim só são apresentadas as características

avaliadas para a escolha do modelo utilizado. É importante salientar que o VANT tem sua própria controladora, para tratar do voo em si, mas interage com outra interface de microcontrolador, que é responsável por monitorar e responder aos sinais emitidos pelos sensores.

Conforme mencionado, na estação base está a parte do software que realiza o processamento de dados em si. Ela é responsável por analisar, classificar, tratar, separar e gerenciar os dados, possibilitando ao agente que esteja na estação tomar ou indicar decisões sobre a qualidade do ar, com base nos dados analisados e classificados.

4.1.1 Aspectos sobre o VANT

Como o interesse deste trabalho consiste em integrar um dispositivo de baixo custo a um VANT para realizar o monitoramento de qualidade do ar, faz-se necessário definir algumas características do VANT a ser utilizado.

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, as características que foram consideradas relevantes para a definição dos componentes de hardware da plataforma de sensoriamento são:

- VANT ter capacidade de voo de até 20 m acima do nível do mar;
- VANT ter 4 motores (quadricóptero);
- Autonomia do VANT por, no mínimo, 30 minutos de voo até uma hora;
- Controladora de voo do VANT de fácil acesso e programação;
- Controladora dos sensores de fácil gerenciamento e programação.

A escolha de um VANT quadricóptero deve-se pelo fato deste tipo de configuração permitir o voo em até 100 m de altura e 1 km de distância horizontal, o que é suficiente para o objeto desta pesquisa. Além disso, os VANTS quadricópteros são mais fáceis de serem encontrados ou fabricados manualmente, possuindo características de baixo custo e acesso fácil a peças de reposição também de baixo custo. Além disso, são facilmente integrados com GPS para determinação de posição.

Outra característica importante desse VANT consiste no fato de os motores precisarem ter um torque de alto valor, garantindo maior estabilidade de voo e contemplando, no mínimo, 1 Kg de carga útil (podendo ser até 10Kg), facilitando o embarque de pequenos equipamentos e sensores.

A partir do levantamento dos requisitos do sistema, foi possível definir que o VANT/drone DJI NAZA-M-LIGHT (modelo quadricóptero, similar aos modelos F450) apresentou-se como a melhor escolha para o projeto. Ele possui uma controladora de voo padrão NAZA, com GPS integrado e motores com torque de 920Kv. Tem capacidade de embarcar no mínimo 650g, com controle de velocidade via ESC (Eletronic Speed Controller ou Controlador Eletrônico de Velocidade). O DJI NAZA é um modelo de baixo custo que atende perfeitamente às necessidades do projeto.

4.2 O Dispositivo Desenvolvido

Para controlar e tratar os sinais oriundos dos sensores e dispositivos do sistema, optou-se pelo microcontrolador ATMEGA328p, com sua interface de acesso Arduino Uno R3 (Figura 4.2). Esta interface possui quatorze pinos de entrada/saída digital (dos quais seis podem ser usados como saídas Pulse Width Modulation-PWM), seis entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, uma porta de conexão USB, uma entrada de alimentação, uma porta de conexão ICSP e um botão de reset. Ele permite controle de vinte dispositivos através de suas configurações, é de baixo custo, fácil aprendizado e já está incorporado ao meio educacional tecnológico nacional.

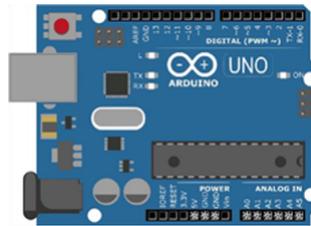


Figura 4.2: Desenho da interface Arduino UNO R3, com microcontrolador ATMEGA328p (Fonte: [Fransiska et al., 2013]).

A partir do levantamento bibliográfico sobre as normas que regem o controle da qualidade do ar e de trabalhos que descrevem a precisão de diversos sensores, definiu-se, como os mais adequados a este projeto, os seguintes sensores: MQ-135, MQ-7, DHT11, PPD42NJ e BMP180.

Os sensores acoplados foram escolhidos pelo baixo custo, além do reduzido consumo de energia que garante uma maior vida útil da bateria e, principalmente, não interfere excessivamente no tempo de voo do VANT que, pelos trabalhos avaliados na revisão bibliográfica, deve ser de no mínimo 30 minutos. Conforme explicado, a interface microcontroladora para os sensores também precisa ser de baixo custo e de baixo consumo, com a capacidade de controlar muitos dispositivos simultaneamente, a fim de coletar diferentes dados ambientais, assim optou-se pelo Arduino.

A Figura 4.3 apresenta o sensor de qualidade do ar MQ-135 utilizado para medir os níveis de CO₂. Este sensor pode detectar as emissões de gases oriundos do processo da queima de combustíveis fósseis como carvão. Ele detecta a emissão de CO₂ em processos naturais ou industriais, possui alimentação de 5 Volts e é ligado na entrada analógica da placa do Arduino R3.



Figura 4.3: Sensor de identificação de CO₂, modelo MQ-135. (Fonte: Datasheet do MQ135)

A Figura 4.4 apresenta o sensor DHT11, responsável pelas medições de umidade e temperatura, permitindo fazer leituras de temperaturas de 0 a $\pm 50^{\circ}\text{C}$, e umidade entre 20 e 90% com acurácia

satisfatória. A alimentação desse sensor é de 5V, com ajuste de medição de temperatura $\pm 2^{\circ}\text{C}$ e ajuste de medição de umidade $\pm 5,0\%$ UR.



Figura 4.4: Sensor de umidade e temperatura, modelo DHT11. (Fonte Datasheet do DHT11)

O sensor de CO é o MQ7 apresentado na Figura 4.5. Este sensor pode detectar as emissões de gases oriundos do processo de combustão de veículos automotores e combustão incompleta da madeira em processos industriais, tratando tal medição em ppm.



Figura 4.5: Sensor de CO, modelo MQ-7. (Fonte: Datasheet da HUANWEI)

A Figura 4.6 apresenta o sensor PPD42NJ, sendo responsável pela captura de partículas em suspensão de tamanhos PM10 e PM2.5. Este sensor trabalha com um laser que é sincronizado em uma lógica de pulsos para serem disparados quando uma partícula atravessa por uma fenda disposta na parte superior do sensor. No seu funcionamento, o receptor capta a luz das partículas espalhadas como um pulso, sendo que, cada linha de pulso é amplificada até que o pulso seja reconhecido claramente. Na Figura 4.7, há um exemplo do tratamento da informação por esse sensor.

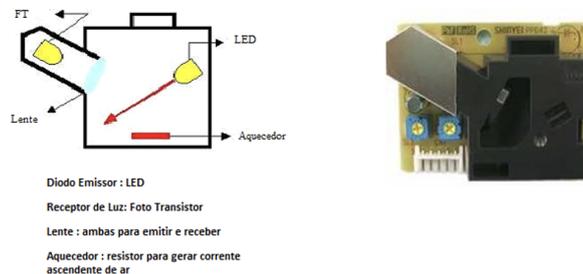


Figura 4.6: Diagrama do sensor PPD42NJ e foto do sensor. (Fonte: Datasheet do PD42NJ)

Para entender esse funcionamento, deve-se perceber que, toda vez que uma linha de pulso é reconhecida, o sensor faz a contagem de acordo com o threshold de pulso. O PPD42NJ pode ler cada pulso selecionado com duas tensões (1V e 2,5V) de detecção de limite (threshold), convertido para pulso. Quando se usa o limite de 1Volt (Lo pulse), ele detecta partículas maiores do que 1

mícron. Quando o limite for de 2,5Volts, ele lê a saída de Lo pulse em P2 e detecta partículas maiores do que 2,5 mícrons.

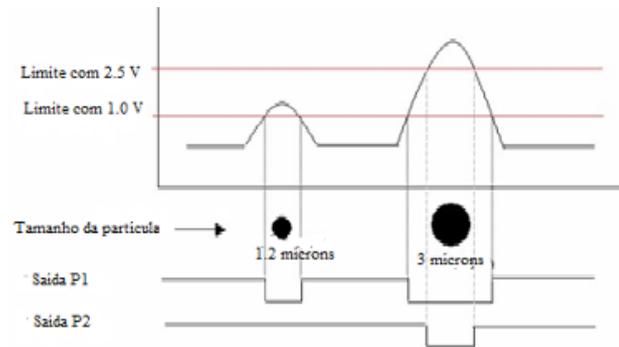


Figura 4.7: Exemplo de operação do sensor PPD42NJ, com uma linha de pulso capturada (Fonte: Datasheet do PPD42NJ)

Outro sensor utilizado é o BMP180 (Figura 4.8). Ele tem como objetivo medir a pressão atmosférica para determinar, com melhor precisão, a altitude de voo do VANT. Ele trabalha com tensões entre 1,8V e 3,6V, mas possui um regulador de tensão e pode operar com 5V. Também pode ser usado para auxílio na medição de temperatura, em conjunto com o sensor DHT11 (Figura 4.4).



Figura 4.8: Exemplo de barômetro utilizado para medições de pressão atmosférica em Pascal BMP180. (Fonte: Datasheet do BMP180)

Agora sobre o armazenamento de dados, o dispositivo desenvolvido utiliza um cartão Micro SD (Figura 4.9) que possui um circuito cmos que faz a gravação dos dados da porta serial do Arduino R3. De acordo com a programação inserida no Arduino R3, pode-se ler e escrever várias vezes em um mesmo cartão.



Figura 4.9: Dispositivo de armazenamento dos dados, no padrão micro SD. Fonte: [DATASHEET, 2018].

A partir dos componentes apresentados, foi possível desenvolver um dispositivo capaz de mo-

monitorar diversas características do ar, permitindo que a partir desses dados o fosse determinada a qualidade do ar avaliado.

4.2.1 Diagrama do hardware acoplado ao VANT

A Figura 4.10 o diagrama eletrônico de ligações entre os componentes sensores, dispositivos e a interface Arduino R3. Esse diagrama apresenta a pinagem utilizada para a montagem, programação e configuração da plataforma de sensoriamento.

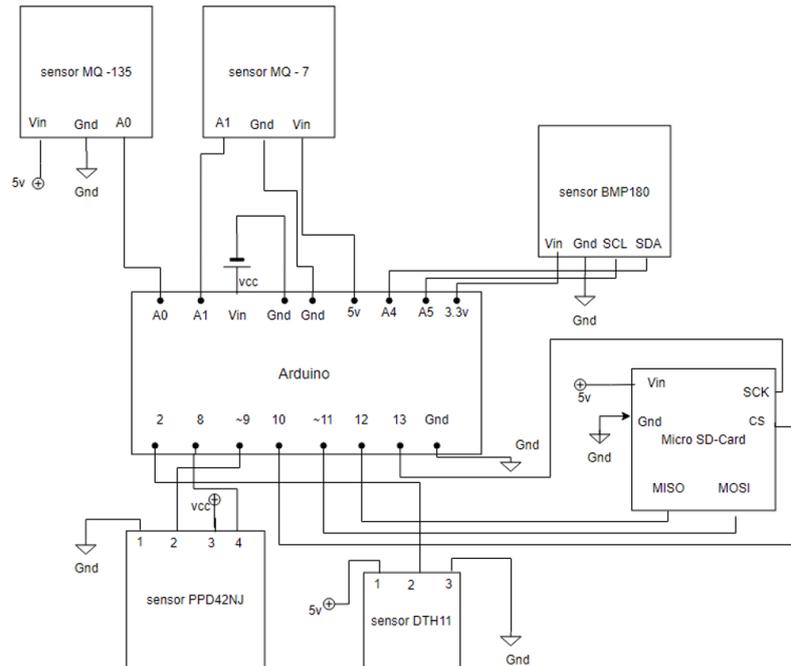


Figura 4.10: Diagrama eletrônico do dispositivo desenvolvido, com as ligações entre o microcontrolador/interface Arduino R3 (com o ATMEGA328P) e os sensores, apresentando as pinagens entre eles. (Fonte: O próprio autor)

A partir desse modelo foi possível construir o protótipo utilizado neste trabalho. Todo o projeto foi baseado na ideia de baixo custo, inclusive para escolher os equipamentos utilizados no encapsulamento dos sensores. A Figura 4.11 apresenta as imagens do dispositivo desenvolvido, onde todos os sensores foram encapsulados.

O dispositivo foi acoplado ao VANT em uma composição de montagem interna, de modo que o fluxo de ar gerado pelo próprio VANT não interfira na ação de captação de partículas e dos elementos dos gases existentes nos ambientes mapeados. A Figura 4.12 apresenta o dispositivo acoplado ao VANT utilizado neste trabalho.

4.2.2 Software do Dispositivo

A parte do software do VANT que compõe a plataforma de sensoriamento possui o módulo de controle do VANT (pré-programado) e o módulo de captação de dados inserido no microcontrola-



Figura 4.11: Dispositivo proposto para o monitoramento do ar. (Fonte: O próprio autor)



Figura 4.12: Dispositivo proposto associado ao VANT. (Fonte: O próprio autor)

dor/interface Arduino R3. O módulo dentro do Arduino R3 é o principal módulo de software do dispositivo, pois é o que vai tratar da captação e organização dos dados oriundos dos sensores.

Para o módulo de captação de dados dos sensores, a programação foi por meio do IDE Sketch para interfaces Arduino. Para avaliação do funcionamento dos sensores foi implementada uma versão de teste que monitorava um ambiente indoor. Esta versão foi integrada ao Node-RED¹. Basicamente, antes de embarcar o dispositivo no drone, é feito teste dos sensores com Node-RED, checando-se o fluxo de informação e verificando se não existem falhas nas leituras dos sensores por algum motivo.

A captura dos dados também é verificada pelo cartão MICRO SD que é embarcado no drone, sendo esses dados gerados no formato csv. Após uma missão, isto é um voo com o drone, com a captura dos dados monitorados, estes são armazenados no cartão de memória e posteriormente analisados na estação base.

4.3 Estação Base

A Estação-Base é o componente que realiza a análise dos dados. Seu principal elemento é o software que trata dessa funcionalidade. Ela possui um sistema computacional constituído por um módulo com capacidade de qualificar os dados. Esse módulo trabalha baseado em um modelo

¹Ver em <https://nodered.org/docs/faq/interacting-with-arduino>.

utilizando lógica fuzzy, emitindo resultados dentro de critérios para qualidade do ar estabelecidos pela OMS [WHO, 2021]. No entanto, para compreensão do modelo torna-se necessário uma breve introdução sobre a teoria da lógica fuzzy.

4.3.1 Aspectos básicos sobre lógica fuzzy

Dentre as inúmeras técnicas de inteligência computacional, a lógica fuzzy foi a técnica que se apresentou mais adequada às características desta pesquisa. Essa técnica permite que as informações sejam vistas e tratadas como faixas de valores de classificação, de modo que problemas com graus elevados de imprecisão e incerteza sejam abordados de forma mais simples do que em modelos de tratamento de dados convencionais [Camastra et al., 2015].

Os sistemas que trabalham com inferência fuzzy são conhecidos como sistemas de inferência nebulosos, pois são modelos computacionais que fazem o mapeamento de uma determinada entrada para uma saída utilizando a teoria de conjuntos fuzzy. Esta teoria trabalha com regras do tipo SE-ENTÃO [Camastra et al., 2015] e permite o tratamento das variáveis em intervalos pré-determinados. Assim, permite que um elemento (como o ar, por exemplo) seja classificado como “bom” se as variáveis monitoradas estiverem em um dado intervalo, “ruim” se elas estiverem em outro intervalo ou “péssimas” se estiverem ainda em outro intervalo, as classes são definidas de acordo com o problema e visão dos especialistas envolvidos.

Na lógica fuzzy, os dados de entradas são mapeados para saída de acordo com regras definidas pelo modelo, produzindo assim uma relação de causa e efeito. A causa constitui-se nos antecedentes, ou seja, os dados de entrada, e o efeito será a saída que estes dados podem apresentar.

O conceito fundamental na definição de um conjunto fuzzy é a função de pertinência ($\mu_A(x)$), bem semelhante a definição clássica de teoria de conjuntos. Isso pode ser visualizado por meio da Equação 4.1.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & : x \notin A \\ 1 & : x \in A \end{cases} \quad (4.1)$$

A função de pertinência é adaptada para o contexto fuzzy, indicando o grau de compatibilidade de x com o conjunto fuzzy do tipo A , no qual: $\mu_A(x) = 1$ indica que x está totalmente em A enquanto que $\mu_A(x) = 0$ indica que x não está em A ; e $0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x está parcialmente em A , com grau $\mu_A(x)$.

Assim, nesta teoria, μ_A assume valores entre $[0, 1]$, aceitando que o valor de pertinência seja representado por um número real neste mesmo intervalo. Os principais operadores nesta teoria são as t-normas e as t-conormas, dos quais o mínimo (\wedge), o máximo (\vee) e a negação (\neg) são apenas casos particulares [Takahashi and Bedregal, 2006]. Estes são conhecidos como operadores de relação. A

desigualdade triangular é também conhecida como t-norma, sendo uma operação binária utilizada geralmente para representar o operador de conjunção (and), ou a interseção. Na lógica fuzzy, esses operadores são usados para definir o grau máximo e mínimo de pertinência dos conjuntos, conforme as Equações 4.2, 4.3 e 4.4.

$$A \cap B = \min(A, B) \quad (4.2)$$

$$A \cup B = \max(A, B) \quad (4.3)$$

$$\neg A = 1 - A \quad (4.4)$$

Os dois primeiros operadores são de interseção e união, enquanto o último é o operador que representa o complemento de um conjunto. Um exemplo das funções de pertinência pode ser visto na Figura 4.13. Tais funções permitem quantificar predicados qualitativos e fazer operações aritméticas com eles.

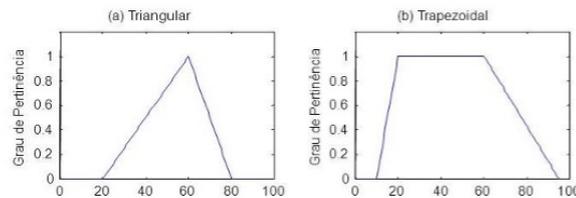


Figura 4.13: Exemplo de funções de pertinência usadas no conjunto fuzzy. Fonte: Mathworks guide (MATLAB, 2021)

Os valores das variáveis na lógica fuzzy são conjuntos que representam uma determinada propriedade ou predicado, diferente das variáveis numéricas utilizadas em outros modelos matemáticos [Cingolani and Alcalá-Fdez, 2012]. Dessa forma, para utilizar um sistema fuzzy é necessário converter valores numéricos em conjuntos fuzzy. Esses processos são denominados de fuzzyficação (de número para fuzzy) e defuzzyficação (de fuzzy para números). A Figura 4.14 apresenta um esquema das funções associadas a essa lógica.

As características das etapas descritas na Figura 4.14 são de que a base de conhecimento deve ser formada por dados e regras. No caso dessa pesquisa, visando classificar a qualidade do ar, os dados são analisados dentro de intervalos numéricos fornecidos pelos órgãos regulamentadores da qualidade do ar, no caso brasileiro o CONAMA. Enquanto as regras são variáveis textuais do tipo bom, regular, alto, baixo e médio, fornecendo uma classificação para a qualidade do ar. O processo de inferência consiste em ativar as regras para cada variável de entrada agregada. Por exemplo, a entrada dos poluentes PM10, PM2.5, CO e CO2 será agregada através do conector AND. Estas

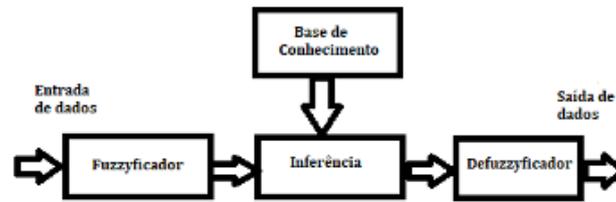


Figura 4.14: Etapas de um sistema fuzzy, com as entradas de dados em um fuzzyficador; a parte de inferência, na qual serão ativadas as regras conforme os dados numéricos extraídos, e o resultado sendo defuzzyficado em uma saída numérica. (Fonte: O próprio autor)

entradas serão os antecedentes da regra que, impondo uma condição IF para cada nível de poluição, terão o conseqüente (saída) que será usado na defuzzyficação usando o conector THEN [Cingolani and Alcalá-Fdez, 2012].

A sintaxe dessa regra fuzzy será definida pelas palavras IF e THEN. Sendo assim, a ativação da regra define como os antecedentes irão modificar os conseqüentes da regra. Através da palavra IF, será ativada para classificar cada conjunto fuzzy com sua relação de pertinência de entrada e, através da palavra THEN, será definido um conjunto fuzzy para saída. A exemplo de uma regra para um sistema fuzzy de qualidade do ar, teremos:

IF (PM 10 is boa) AND (PM2.5 is boa) AND (CO is boa) AND (CO2 is boa) THEN (output is MUITO BAIXO).

Esta regra define o nível de poluição do ar como “muito baixo” para os valores dos poluentes com intervalos bons de qualidade do ar. Observe que essa qualificação de muito baixo é definida de acordo com os critérios numéricos definidos pela CONAMA.

As relações de pertinência estão entre parênteses conforme a regra do exemplo, tanto para os intervalos dos conjuntos fuzzy de entrada como de saída. Os conjuntos fuzzy de entrada e saída são mais detalhados nas próximas seções.

Como já mencionado, o fuzzyficador é responsável por associar um valor numérico a um conjunto fuzzy correspondente de entrada e o defuzzyficador transforma tais conjuntos de saída em valores numéricos que vão ser resultado da análise.

4.3.2 Abordagens de lógica fuzzy

Para esta pesquisa, foram examinadas duas implementações de abordagens fuzzy, a primeira de uma biblioteca do MATLAB e a segunda de uma outra biblioteca em JAVA. Para compreender tais abordagens torna-se necessário compreender que um controlador, no caso deste trabalho, também chamado de algoritmo fuzzy, consiste em uma interface programável responsável que implementa padrões com a sintaxe de programação prevista na norma IEC61131-7 [Cingolani and Alcalá-Fdez, 2012; Acampora et al., 2013].

O item 7 da norma especifica a implementação dos FLCs (Fuzzy Logic Controller); os padrões da norma IEC61131 são definidos também para programação de Controladores lógicos - CLP (Controlador Lógico Programável). Os CLPs ou PLC (Programmable Logic Controllers) são muito utilizados em automação e em mecatrônica. São circuitos programáveis implementados em máquinas que realizam tarefas cíclicas [Quezada et al., 2014].

Controlador Mamdani

Um dos primeiros métodos fuzzy para modelagem dos controladores foi proposto por Mamdani [Mamdani and Assilian, 1975]. Este método possui uma função de pertinência para entrada do conjunto fuzzy, com o intervalo de entrada pré-configurado [Camastra et al., 2015]. Ela indica o grau de compatibilidade de um elemento unitário com determinado conjunto fuzzy.

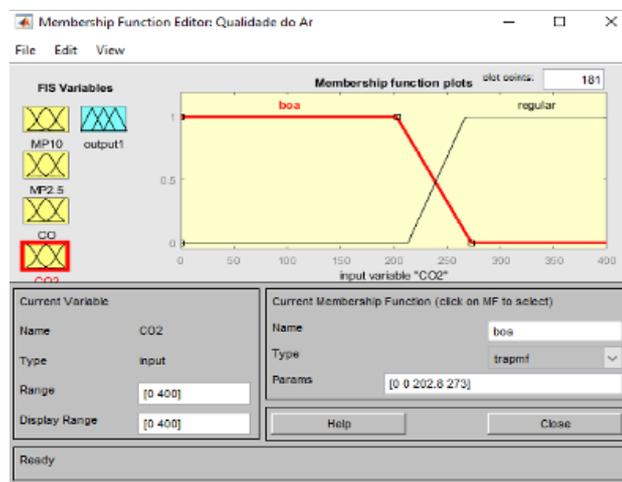


Figura 4.15: Modelo de entrada de dados de CO2 para o Controlador Mamdani que se utiliza de uma função de pertinência trapezoidal. (Fonte: O próprio autor)

Neste trabalho, o controlador Mamdani foi implementado por meio da ferramenta Fuzic Logic Toolbox do Matlab [Guide, 2017]. Esse controlador usa as funções de pertinência para entrada de cada conjunto de dados em um intervalo coerente com o problema, neste caso, de acordo com os valores orientados pelos órgãos de controle de qualidade do ar.

A forma de função trapezoidal (Figura 4.13) representa como os dados são tratados e foi utilizada de modo a distinguir intervalos conforme uma classificação pré-inserida na base de conhecimento. A Figura 4.15 apresenta como os dados foram modelados por essa função de pertinência (também chamada de membership).

Após classificar os dados na entrada, esse tipo de algoritmo usa uma função de inferência para obter as saídas do sistema, assim como ocorre com a lógica proposicional. Nesse processo, a conclusão é obtida pela utilização dos conectores lógicos tipo AND que permitem tratar essas conexões de saída (Figura 4.16).



Figura 4.16: Controlador Mamdani executando função de saída, determinando termos textuais, tais como, MBOA (Muito Boa), BOA, MEDIA, RUM e MRUIM (Muito Ruim), aos valores numéricos encontrados. (Fonte: O próprio autor)

A Figura 4.17 apresenta um exemplo prático do uso do controlador Mamdani, por meio de critérios definidos para esta pesquisa, no caso, para análise das partículas PM10, PM2.5, CO e CO2, com termos textuais básicos, tais como: MBOA (Muito Boa), BOA, MÉDIA, RUM e MRUIM (Muito Ruim).

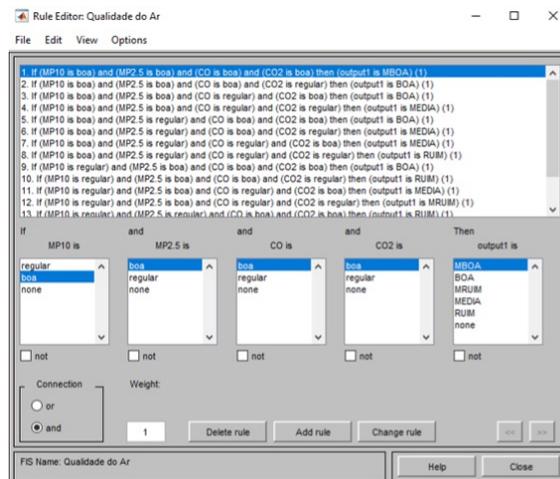


Figura 4.17: Exemplo de quadro com regras e os termos fuzzy associados às entradas numéricas do controlador Mamdani, definidos no ambiente do MATLAB, para análise de dados. (Fonte: O próprio autor)

Para a defuzzificação, o Controlador Mamdani utiliza o método do centroide [Cingolani and Alcalá-Fdez, 2012]. O método centroide consiste em achar a projeção no eixo das abscissas (eixo “x”) do centro da área da curva gerada no processo de inferência que é a saída do controlador fuzzy. O cálculo do centroide é definido pela Equação 5.

$$x_{centroide} = \frac{\sum_i \mu(x_i) x_i}{\sum_i \mu(x_i)} \quad (4.5)$$

com $i = 1, \dots, n$, onde n consiste na quantidade de saídas do processo de inferência.

Nesta equação $\mu(x_i)$ consiste no valor da função de pertinência no valor x_i para o universo a ser analisado. A transformação do valor linguístico da saída em um valor numérico bem definido é o resultado da defuzzificação.

Algoritmo Fuzzy com Java

O processo de modelagem por meio da biblioteca jFuzzyLogic [Cingolani and Alcalá-Fdez, 2012] utiliza uma função de construção de blocos (Function Block ou FB). Nesse ambiente, cada FB é composta das seguintes seções: “VAR INPUT” para variáveis de entrada; “VAR OUTPUT” para variáveis de saída, no qual cada variável é associada a tipos e valores padrões, tais como “FUZZIFY”, no qual se define as funções de pertinência e de fuzzyficação; “DEFUZZIFY” para tratar das funções de defuzzificação, no qual definem-se as relações entre entrada, saída, valores numéricos e termos textuais; e “RULEBLOCK”, no qual as regras de fuzzy são inseridas e configuradas.

Nesse tipo de aplicação de algoritmo fuzzy, pode-se ter inúmeras variáveis de entrada e de saída que são habilitadas por um sinal externo ou com atribuições de variáveis locais, sendo que, cada FB tem apenas um bloco de execução. A implementação de uma FB também é descrita pela norma IEC61131-7 [Cingolani and Alcalá-Fdez, 2012]. A biblioteca do jFuzzyLogic trabalha com a integração de diferentes controladores fuzzy (aqui foi utilizado o Mamdani) e seus aplicativos derivados. Essa biblioteca permite criar instâncias de códigos com portabilidade, capazes de serem adaptados a diferentes sistemas de programação [Cingolani and Alcalá-Fdez, 2012].

Configurações para o software da estação-base

Uma das fases de configuração do software de análise de dados utilizado na estação-base são as definições das regras utilizadas no sistema para qualificação dos dados de ar coletados pelo VANT, assim como os intervalos de entrada de dados.

As regras definem a base do conhecimento e foram obtidas pelos regulamentos (CONAMA e OMS), além de trabalhos similares encontrados na revisão da literatura. Optou-se também em restringir ao tratamento das funções associadas à lógica fuzzy por meio do Mamdani em conjunto com funções da biblioteca jfuzzy [Cingolani and Alcalá-Fdez, 2012; Bonanno et al., 2017]. Tal escolha justifica-se devido ao Método Mamdani ser o mais simples dos sistemas fuzzy conhecidos, sendo baseado em uma estrutura de min-max (Equações 4.3 e 4.4) que facilita a compreensão do processo [Cingolani and Alcalá-Fdez, 2012].

Para a construção do fuzzy inference system (FIS) foi utilizada apenas uma FB. Essa FB faz parte do controlador, baseada no Mamdani da biblioteca do jFuzzyLogic. Neste caso, cada variável de entrada foi parametrizada no mesmo intervalo para que fosse possível comparar os valores de

saída do sistema fuzzy.

Para esse trabalho, as variáveis de entrada foram: PM10, PM2.5, CO2 e CO. A Figura 4.18 apresenta a fuzzyficação deles como as variáveis textuais BOA e REGULAR. Assim, cada variável de entrada no controlador é representada por um conjunto fuzzy. Os intervalos definidos constituem valores de concentração permitidos pelo CONAMA.

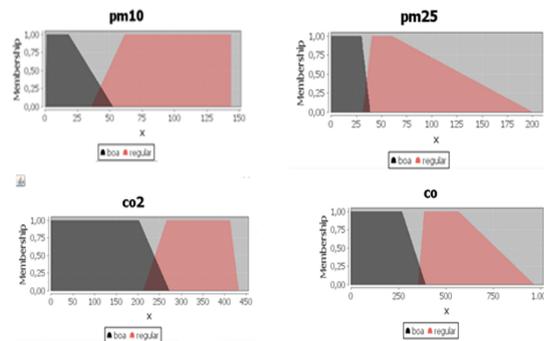


Figura 4.18: Variáveis de entrada usando modelagem (JAVA). Relacionados termos linguísticos de entrada (PM10, PM2.5, CO e CO2), intervalos numéricos e termos linguísticos de saída (BOA e REGULAR). (Fonte: O próprio autor)

A partir dessa construção das variáveis de entrada aplicam-se as regras de inferência fuzzy, conforme apresentado anteriormente. Assim, obtém-se uma qualificação para o ar com o processo de defuzzyficação.

4.4 Integração do sistema de sensoriamento

A Figura 4.19 mostra a arquitetura de execução da Plataforma de Sensoriamento, com as interfaces de hardware e software já descritas anteriormente. O sistema de análise de dados é feito à parte do sistema embarcado, como descrito, com os resultados obtidos da sondagem ambiental.

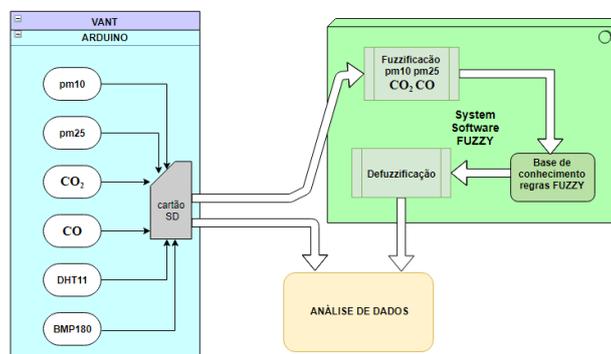


Figura 4.19: Arquitetura da Plataforma de Sensoriamento em execução (Fonte: O próprio autor)

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentadas as definições dos testes realizado, uma breve descrição da região monitorada e uma validação dos sensores. Além disso, são apresentados os resultados obtidos a partir de uma análise estatística e da aplicação da abordagem fuzzy. Por fim, uma discussão sobre os resultados é realizada.

5.1 Definições de Configurações para os Testes

Esta seção apresenta as configurações utilizadas no VANT, na estação-base e alguns detalhes dos dados monitorados.

5.1.1 Configurações do VANT e da Estação-Base

O VANT foi configurado para voo autônomo, para uma altitude máxima de 20 metros, dentro das normas da ANAC [ANAC, 2021] e pelo fato de uma das áreas examinadas ser próxima a uma área militar, apresentando restrições de voo. A altura definida está de acordo com os trabalhos relacionados, sendo suficiente para captar dados sobre a qualidade do ar.

O tempo de voo programado em cada medição foi de 20 e 25 minutos, usando subida diagonal lenta e compensando o vento para não interferir na coleta de dados. Todos os dados coletados foram armazenados no cartão de memória. A não utilização de comunicação sem fio, deve-se a proximidade com a área militar que dificulta a comunicação por radio.

Os dados armazenados no cartão de memória são carregados no ambiente da estação-base para que possam ser analisados. A estação-base consiste em uma plataforma de software implementada em linguagem Python em um Notebook Core I5, com 4GB de RAM, 300GB de HD. Esse sistema possui uma interface com as bibliotecas de lógica fuzzy implementadas em MATLAB e JAVA, permitindo que os dados sejam analisados e qualificados.

Tabela 5.1: Limites de entrada de conjuntos fuzzy de acordo com padrões das normas nacionais e internacionais.

| Sensor | Limite inferior conjunto fuzzy | Limite superior conjunto fuzzy |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|
| PM2.5 | 0 $\mu g/m^3$ | 60 $\mu g/m^3$ |
| PM10 | 0 $\mu g/m^3$ | 120 $\mu g/m^3$ |
| CO | 0 ppm | 500 ppm ¹ |
| CO2 | 0 ppm | 400 ppm |

5.1.2 Tabela de dados a ser considerada para a análise

A Tabela 5.1 apresenta a faixa de limites dos dados que foram utilizados para a análise e classificação da qualidade do ar. Os intervalos dos sensores formam os conjuntos fuzzy que entram no controlador fuzzy durante o processo de fuzzificação.

5.2 Ambiente Escolhido para o Monitoramento

Foram realizados mapeamentos e sensoriamentos em uma área industrial com baixa incidência de habitação, próximo ao bairro de Santa Cruz-RJ, e em uma área próxima do litoral, no bairro de Recreio dos Bandeirantes-RJ. Ambas as áreas localizadas na zona oeste do município do Rio de Janeiro. Os pontos monitorados podem ser observados na Figura 5.1. Em Santa Cruz, o local corresponde as coordenadas 22°53'52.1"S e 043°44'18.7"W. Já o outro local, corresponde a uma área próxima ao litoral, no bairro de Recreio dos Bandeirantes, com localização 23°02'04.0"S e 043°29'32.6"W.

A escolha da região de Santa Cruz deve-se a intenção de comprovar a existência de poluentes atmosféricos em ambiente cuja medição carece de sistemas automatizados para fazê-lo, sendo uma região de grande importância para a cidade do Rio de Janeiro devido ser um polo industrial. Já a escolha da região do Recreio deve-se a ser uma região com baixo índice de industrialização, o que não ocorre nos bairros vizinhos de Guaratiba e Campo Grande, que apresentam algum nível de presença de indústrias devido a proximidade com o polo de Santa Cruz.

Foram realizadas três medições na parte do ambiente mais perto do polo industrial e três medições em ambiente mais distante, em área de proteção ambiental, a fim de que houvesse comparações e fosse possibilitada uma análise mais acurada da percepção da plataforma de sensoriamento em si. Cabe salientar que para a validação do sistema foi escolhida a região de Campo Grande, na zona oeste do Rio de Janeiro. Tal escolha deve-se ao fato da prefeitura fornecer dados oficiais diários de monitoramento para aquela região.

¹limite superior em ambiente dispersivo para valores maiores que 500 ppm em zonas industriais e presença de queimadas.

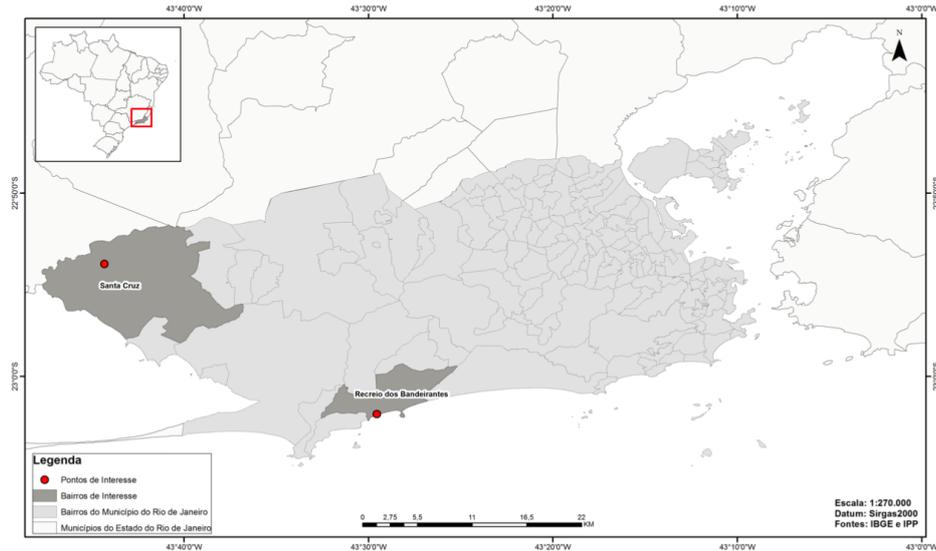


Figura 5.1: Representação geográfica das regiões monitoradas com o VANT na cidade do Rio de Janeiro. (Fonte: O próprio autor)

5.3 Validação dos Sensores

Considerando que, neste estudo, as sondagens foram realizadas em dois ambientes distintos, de modo a haver comparações dos índices de qualidade do ar obtidos pelos dispositivos embarcados, fez-se necessário ajustes para que os sensores pudessem captar as partículas específicas com acurácia. Os sensores empregados em cada ambiente estão apresentados na Tabela 5.2 e suas características técnicas estão descritas na Tabela 5.3.

Antes de realizar os ensaios propriamente ditos, realizaram-se testes operacionais do dispositivo com os sensores acoplados à porta serial, ligados a um notebook. Foram verificados o funcionamento do software, assim como a comunicação com a saída serial, utilizada para checar a leitura dos sensores. Foram testados os níveis de consistência das medidas, de modo a confirmar se eles estavam dentro dos critérios estabelecidos no manual do fabricante e dos padrões nos quais o trabalho se orientou.

Não houve, para as medições, nenhuma alteração na parte eletrônica, nem no firmware dos sensores, sendo que estes já continham a calibragem padrão de fábrica. Foram testados apenas os limites de captação, tensão submetida e de obtenção de dados por ambiente.

Uma vez que foram verificados os níveis de tensão para cada sensor, o passo seguinte foi observar a saída serial da placa Arduino para se observar os dados obtidos. Isso foi realizado utilizando-se a função Monitoramento Serial do ambiente IDE sketch, no qual é possível verificar os dados lidos por cada sensor. Com base no que foi visto nos testes, com foco no tempo de resposta e na leitura dos sensores correspondentes, pode-se ajustar os limites que seriam utilizados nas medições em campo.

Já para os sensores de umidade e temperatura, foi realizado uma comparação entre o que foi

Tabela 5.2: Principais componentes eletrônicos utilizados nos ambiente avaliados e custo de cada um deles.

| Dispositivo Embarcado | Ambientes 1 e 2 | Valores (US\$) |
|------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Microcontrolador | ATMEGA 328p | \$15.76 |
| Sensor Dióxido de Carbono | MQ135 | \$4.61 |
| Sensor Monóxido de Carbono | MQ-7 | \$4.39 |
| Sensor Umidade e Temperatura | DHT11 | \$3.55 |
| Sensor Material Particulado | PPD42NJ | \$7.75 |
| Sensor Pressão Atmosférica | BMP180 | \$2.56 |
| Média dos Valores | | \$38.62 |

lido na porta serial e o obtido via sites especializados na Internet que informam a umidade relativa do ar e a temperatura de um local específico.

Para verificar a sensibilidade de detecção quanto aos sensores de gás, foi montado um esquema de teste baseado em uso de material inflamável para que se produzisse fumaça, o que serviu para verificação de concentração de CO₂. Com base em uma percepção temporal (a cada três segundos), pode-se observar o grau de acurácia de leitura relativa ao sensor de CO₂. Os demais sensores de gás também foram ajustados utilizando-se esta técnica. Outra forma auxiliar para se ajustar a

Tabela 5.3: Características operacionais dos sensores.

| Função do Sensor | Tempo de resposta (segundos) | Tensão de operação |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Sensor Dióxido de Carbono | 0 a 3s | 5V±0,1V |
| Sensor Monóxido de Carbono | 0 a 3s | 5V±0,1V |
| Sensor Umidade e Temperatura | 2s | 3 a 5,5V |
| Sensor Material Particulado | 60s | 0,7 a 5V |
| Sensor Pressão Atmosférica | 1s | 3,3V |

sensibilidade dos sensores foi realizar medições em ambiente indoor, nas quais as concentrações dos gases tendem a se manterem estáveis. Os valores obtidos, comparados com outros já disponíveis em trabalhos anteriores. A Figura 5.2 apresenta a tela de um sistema desenvolvido em NodeRed para auxiliar nessa avaliação, sendo os valores monitorados em tempo real.

Importante destacar que, caso fosse observado alguma discrepância entre o medido e o esperado, em valores muito significativos (da ordem de ±80%), seriam feitos mais ajustes no esquema de ligação elétrica, tais como acrescentar resistores ou capacitores para eliminar ruídos elétricos, ou eliminar algum tipo de fonte antropogênica com resíduos químicos gerados por atividade humana. Neste trabalho, o que foi medido indoor confirmou a acurácia dos sensores, considerando-os dentro da normalidade em precisão e detecção.

Em relação ao ajuste do barômetro, a sintonia fina foi realizada em local neutro e plano, no nível do mar (fora dos dois ambientes de medida), no qual o VANT estacionou a 5 metros de altitude. Na leitura do Monitoramento Serial, no IDE sketch do Arduino, observou-se o valor que foi usado



Figura 5.2: Sistema em NodeRed para validação do monitoramento em um ambiente Indoor em tempo real. (Fonte: O próprio autor)

como base para o nível do mar, de 101,3KPa.

Para medir a acurácia do sensor de material particulado, utilizou-se um pano de tecido normal, impregnado com pó comum que foi sacudido próximo ao sensor para medir os índices de PM10 e PM2.5. Observou-se se eles identificaram a presença das partículas indicadas. Uma vez verificada a saída serial do IDE Arduino para esse caso, comprovou-se que os sensores já estavam bem ajustados para medir tais partículas.

5.4 Preparação e tratamento dos dados

A preparação feita sobre os dados obtidos dos sensores foi realizada com uso de um pequeno sistema de análise de dados, desenvolvido através da linguagem Python, no ambiente de desenvolvimento Jupyter. Nesse sistema, a saída produzida representa um tratamento estatístico que pode servir para geração de um dashboard.

Os dados capturados pelo dispositivo são armazenados, em formato .csv, e levados à estação-base que contém o ambiente para a preparação dos dados. A Figura 5.3 apresenta o resultado deste tratamento de dados.

A Figura 5.3 representa a saída do sistema em Python, sendo que os campos e linhas apresentados

| | count | mean | std | min | 25% | 50% | 75% | max |
|-----------------|--------|---------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| segundo | 1431.0 | 716.000000 | 413.238430 | 1.00 | 358.50 | 716.00 | 1073.50 | 1431.00 |
| CO | 1431.0 | 136.672956 | 19.044793 | 124.00 | 126.00 | 129.00 | 139.00 | 244.00 |
| CO2 | 1431.0 | 367.779175 | 24.016227 | 342.00 | 350.00 | 361.00 | 378.00 | 451.00 |
| PM10 | 1431.0 | 1.331593 | 11.611515 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 270.00 |
| PM25 | 1431.0 | 1.203012 | 11.056989 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 254.17 |
| ConcPM1 | 1431.0 | 0.571244 | 4.981319 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 115.83 |
| ConcPM25 | 1431.0 | 0.002467 | 0.022889 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.53 |
| Pressao | 1431.0 | 101168.276031 | 13.070170 | 101139.00 | 101158.00 | 101168.00 | 101179.00 | 101199.00 |
| Temp | 1431.0 | 28.673375 | 0.315802 | 27.90 | 28.50 | 28.80 | 28.90 | 29.20 |
| Alt | 1431.0 | 13.044570 | 1.094647 | 10.58 | 12.16 | 13.08 | 13.91 | 15.50 |

Figura 5.3: Modelo de saída do tratamento estatístico realizado com Python sobre os dados capturados (representando o primeiro dataset da etapa de análise). (Fonte: o próprio autor)

têm o seguinte significado:

- Cada linha representa um dos parâmetros capturados pelo dispositivo, através de seus sensores: CO são os dados de gás carbônico, CO2 os do dióxido de carbono, PM10 é sobre as partículas PM1.0, e assim por diante;
- O campo Count representa a contagem de linhas de dados para cada parâmetro da planilha .csv. No caso do exemplo, foram obtidos 1431 linhas de dados para cada parâmetro;
- Mean significa a média de todos os valores, por parâmetro, considerando as 1431 linhas de dados, tendo ela dados válidos ou não;
- Std é o desvio padrão dos valores relacionados, também pôr parâmetro examinado;
- Min é o valor mínimo entre todas as 1431 linhas, para cada parâmetro (CO, CO2 e etc);
- Max é o valor máximo obtido ente todas as 1431 amostras de cada parâmetro (que são as 1431 linhas);
- Os campos de 25%, 50% e 75% representam os quartis para cada parâmetro, sendo que, para este caso, 25% é o primeiro quartil; 50% é quartil médio e 75% é o quartil superior.

Para essa análise, os valores mais importantes são Min e Max, pois estes são os mais os indicadores mais relevantes, indicando baixa e alta poluição respectivamente, auxiliando na constatação da existência ou não de alta poluição.

Para o tratamento estatístico, a saída do Sistema Python, visto na Figura 5.3, é usada como base para gerar os primeiros gráficos indicativos da probabilidade de dispersão dos poluentes. Eles estão representados na Figura 5.4, nos quais são observados os níveis de dispersão gerados a partir de toda a amostra, tanto para o parâmetro CO (a), como para o CO2(b).

Deste modo, tem-se uma primeira visão da dispersão das partículas (seja CO, CO₂, PM_{2.5} ou PM₁₀), associado ao ambiente no qual o VANT utilizou o dispositivo para capturar a informação, apresentando uma primeira etapa para a qualificação do ar.

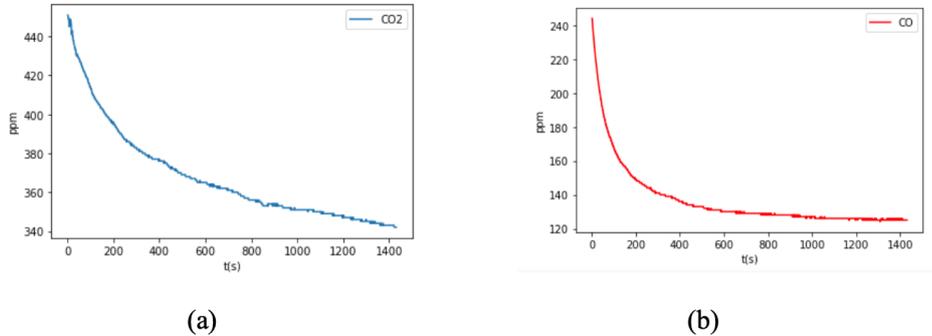


Figura 5.4: Primeira representação de níveis de CO₂ (a) e CO (b) do ambiente examinado, extraídos do dataset gerado pelo sistema em Python. (Fonte: o próprio autor)

Antes da aplicação dos algoritmos fuzzy, os dados são pré-processados, retirando-se todos os dados nulos e valores de leitura com alguma incoerência. Essa etapa é realizada para os parâmetros (CO, CO₂, PM_{2.5}, PM₁₀) com aplicação de algoritmos de simples de filtragem.

A Figura 5.5 apresenta o resultado para os dados pré-processados que agora podem ser submetidos a abordagem fuzzy. Lembrando que o valor associado à qualidade do ar é obtido através das fórmulas de avaliação fornecidas pelo CONAMA [CONAMA, 2018], a partir dos dados: CO, CO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, Pressão e Temperatura (Temp).

| | count | mean | std | min | 25% | 50% | 75% | max |
|-----------------|-------|--------------|-----------|-----------|-------------|------------|-------------|-----------|
| segundo | 40.0 | 20.50000 | 11.690452 | 1.00 | 10.7500 | 20.500 | 30.2500 | 40.00 |
| CO | 40.0 | 135.82500 | 19.100124 | 125.00 | 126.0000 | 127.500 | 132.2500 | 209.00 |
| CO2 | 40.0 | 364.97500 | 25.915531 | 342.00 | 348.0000 | 353.000 | 368.7500 | 437.00 |
| PM10 | 40.0 | 47.63775 | 51.780151 | 15.76 | 15.8200 | 33.780 | 57.1625 | 270.00 |
| PM25 | 40.0 | 44.88375 | 50.280718 | 15.75 | 15.8175 | 25.870 | 46.1225 | 254.17 |
| ConcPM1 | 40.0 | 20.43625 | 22.213829 | 6.76 | 6.7900 | 14.495 | 24.5200 | 115.83 |
| ConcPM25 | 40.0 | 0.08825 | 0.106984 | 0.00 | 0.0300 | 0.040 | 0.0975 | 0.53 |
| Pressao | 40.0 | 101167.22500 | 13.531516 | 101145.00 | 101155.7500 | 101166.000 | 101174.2500 | 101194.00 |
| Temp | 40.0 | 28.70750 | 0.346697 | 27.90 | 28.7000 | 28.800 | 28.9000 | 29.10 |

Figura 5.5: Dados obtidos após a fase de pré-processamento. (Fonte: o próprio autor).

No processo de defuzzificação, cada relação de interseção dos conjuntos fuzzy é gerada de acordo com as regras estabelecidas no processo de inferência. Disso resulta uma saída numérica que consiste no valor da Qualidade Final (consolidada).

Para qualificar esse valor, utilizou-se a Tabela 5.4 que descreve o intervalo de saída dos conjuntos fuzzy, relacionados aos valores fornecidos pelo CONAMA [CONAMA, 2018] sobre qualificação do ar. Como pode ser observado, para cada entrada da Qualidade, os valores são correlacionados a termos linguísticos que indicam o nível de poluição do ar, conforme já visto. As regiões de interseção

mostram que o ar está em um ponto de mudança entre uma classe e outra, o que para as classes BOA para MEDIA ou MEDIA para RUIM pode ser algo bem preocupante.

Tabela 5.4: Referências para defuzzificação do algoritmo fuzzy

| Saída fuzzy/ Qualidade do Ar | MBOA | BOA | MÉDIA | RUIM | MRUIM |
|---------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Intervalos de saída fuzzy | 0,21-2,13 | 0,8-4,05 | 3,11-8,95 | 7,05-12,6 | 11,9-22,7 |

5.5 Aplicação das técnicas fuzzy

Esta seção apresenta a aplicação das técnicas de lógica fuzzy utilizando as bibliotecas do MATLAB e do JAVA no contexto do problema de qualidade do ar, utilizando os dados monitorados pelo dispositivo proposto.

5.5.1 Abordagem com a biblioteca fuzzy do MATLAB

Para o tratamento fuzzy na aplicação MATLAB, principalmente aquela que contém os dados do ambiente menos poluído, trabalhou-se com quatro dos parâmetros obtidos nas medições: PM10, PM2.5, CO e CO2. Os parâmetros de temperatura, umidade e pressão não foram considerados como entrada no controlador.

A Figura 5.6 a entrada e saída de dados do modelo fuzzy de um exemplo submetido ao controlador Mamdani do MATLAB. A Saída fuzzy para esse conjunto de dados retornou o valor de 4.24. Este valor vai ser classificado na Tabela 5.4 como MÉDIO, significando que a poluição na área examinada se encontra mediana, segundo os padrões determinados pelo CONAMA.

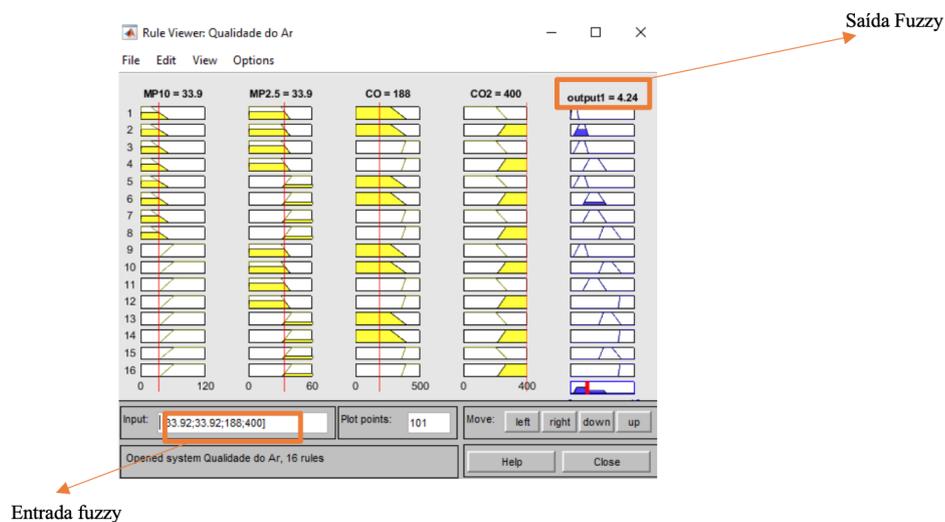


Figura 5.6: Exemplo de submissão dos dados medidos ao controlador Mamdani na aplicação MATLAB. (Fonte: o próprio autor)

5.5.2 Abordagem com a biblioteca fuzzy do JAVA

A entrada de dados do controlador fuzzy no JAVA é realizada por meio de codificação. Analogamente ao processo anterior, foram criadas as mesmas quatro variáveis de entrada por meio de uma função Bloco, de forma semelhante ao apresentado na Figura 5.6.

As variáveis foram ativadas de acordo com seus valores obtidos na base de dados após o pré-processamento. A parte do código descrita na Figura 5.7 gera uma saída fuzzy usando a mesma entrada de parâmetros utilizada na aplicação do MATLAB.

```
//Mostrar as regras da base de conhecimento
FunctionBlock functionBlock = fis.getFunctionBlock(null);
JFuzzyChart.get().chart(functionBlock);

//Set entradas
functionBlock.setVariable("pm10",34.6);
functionBlock.setVariable("pm25",14.03);
functionBlock.setVariable("co",255);
functionBlock.setVariable("co2",251);
```

Figura 5.7: Representação do código de entrada de dados para a biblioteca fuzzy em JAVA. (Fonte: o próprio autor)

A Figura 5.8 apresenta a saída fuzzy do controlador Mamdani JAVA, representando a mesma área que foi calculada pelo controlador Mamdani da aplicação MATLAB, gerando também o valor 4.24. Deste modo, comparando os valores, observa-se que os resultados obtidos são semelhantes, confirmando a mesma faixa da Tabela 5.4 para ambas as abordagens. Em suma, ambas as aplicações confirmam que a qualidade do ar da região examinada encontra-se no nível médio.

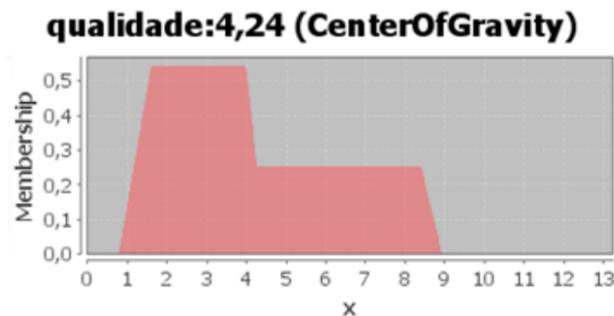


Figura 5.8: Saída Fuzzy para controlador Mamdani da aplicação JAVA. (Fonte: o próprio autor)

Comparação entre as aplicações MATLAB e JAVA

A Tabela 5.5 apresenta diversos valores associados a medidas de CO, CO2, PM10 e PM2.5, no qual cada linha serviu de entrada para ambas as aplicações, sendo possível a determinação dos mesmos padrões linguísticos: BOA, RUIM, MÉDIA. Pode se observar também que não existe uma discrepância significativa entre os valores obtidos.

Na Tabela 5.5, cada uma das linhas representa uma medição de tempo distinto na mesma região, obtida pelos sensores. Os valores de cada linha serviram de entrada para os controladores de

Tabela 5.5: Resultados da saída fuzzy com MATLAB e JAVA.

| Valores de Entrada | | | | Valores de Saída | |
|--------------------|-----|--------|--------|------------------|-------------|
| CO | CO2 | PM10 | PM2,5 | MATLAB | JAVA |
| 209 | 437 | 15,86 | 15,86 | 2,78 | 2,77 |
| 188 | 428 | 33,92 | 33,92 | 4,24 | 4,24 |
| 175 | 420 | 88,71 | 88,70 | 12,31 | 16,36 |
| 166 | 412 | 33,83 | 17,97 | 2,73 | 2,73 |
| 159 | 406 | 88,30 | 88,29 | 12,33 | 16,2 |
| 155 | 402 | 192,31 | 192,31 | 14,41 | 14,41 |
| 151 | 397 | 88,74 | 88,73 | 14,1 | 14,1 |
| 148 | 394 | 15,76 | 15,75 | 2,78 | 2,77 |
| 137 | 377 | 33,77 | 33,77 | 4,18 | 4,02 |
| 133 | 371 | 58,27 | 42,47 | 14,1 | 12,32 |
| 132 | 368 | 15,81 | 15,81 | 2,77 | 2,77 |
| 131 | 367 | 15,80 | 15,79 | 2,78 | 2,77 |
| 131 | 365 | 15,92 | 15,92 | 2,78 | 2,77 |
| 130 | 364 | 16,16 | 16,16 | 2,78 | 2,77 |
| 129 | 360 | 15,85 | 15,85 | 2,78 | 2,78 |
| 129 | 357 | 33,79 | 17,99 | 2,73 | 2,72 |
| 128 | 356 | 15,82 | 15,82 | 2,78 | 2,77 |
| 128 | 356 | 57,31 | 42,20 | 14,1 | 12,33 |
| 128 | 353 | 131,79 | 131,78 | 14,1 | 16,57 |
| 128 | 354 | 15,81 | 15,81 | 2,78 | 2,77 |
| 127 | 353 | 15,81 | 15,80 | 2,78 | 2,77 |
| 127 | 352 | 15,82 | 15,81 | 2,78 | 2,77 |
| 127 | 352 | 33,81 | 33,80 | 4,19 | 4,18 |
| 127 | 351 | 15,80 | 15,79 | 2,78 | 2,77 |
| 126 | 351 | 57,13 | 41,33 | 14,1 | 12,31 |
| 126 | 351 | 15,78 | 15,77 | 2,78 | 2,77 |
| 126 | 351 | 88,76 | 88,75 | 14,1 | 12,32 |
| 126 | 349 | 33,90 | 33,90 | 4,23 | 4,23 |
| 126 | 349 | 15,79 | 15,78 | 2,78 | 2,77 |
| 126 | 348 | 57,14 | 57,14 | 14,1 | 12,32 |
| 125 | 348 | 15,83 | 15,82 | 2,78 | 2,77 |
| 126 | 347 | 15,82 | 15,82 | 2,78 | 2,77 |
| 125 | 346 | 33,79 | 33,79 | 4,19 | 4,18 |
| 125 | 346 | 57,11 | 57,11 | 14,1 | 12,32 |
| 125 | 345 | 33,76 | 33,75 | 4,17 | 4,16 |
| 125 | 344 | 15,83 | 15,82 | 2,78 | 2,77 |
| 126 | 344 | 270,00 | 254,17 | 14,1 | 17,2 |
| 126 | 343 | 57,08 | 57,08 | 14,1 | 12,32 |
| 126 | 343 | 57,23 | 41,44 | 14,1 | 12,32 |
| 125 | 342 | 15,79 | 15,78 | 2,78 | 2,77 |
| Qualidade | | | | 6,91 | 6,84 |

cada aplicação, gerando uma saída fuzzy correspondente àquela medição. Ao final, com os valores fuzzy de todas as medições, é realizado a média de determinação da qualidade por aplicação. No exemplo acima, a Média de Qualidade do Ar da aplicação MATLAB foi 6,91 e da aplicação JAVA foi 6,84, uma diferença de menos de 2%.

Essa média de qualidade é a entrada para o processo de defuzzyficação, que transforma o valor numérico em texto legível. No caso, ambas as medidas de qualidade resultantes das aplicações indicam que, aquela região tem uma média de qualidade de ar MÉDIA.

Nota-se que algumas medições variam de BOA a RUIM, mas o que deve ser considerada é a média dessas quarenta medições, validadas após o tratamento e pré- processamento dos dados. Os valores referem-se a tempos de medições distintos e indicam que, em alguns instantes, a área examinada possui uma qualidade RUIM e, em outros, uma qualidade BOA, o que é uma indicação que existe uma qualidade de ar MÉDIA, com tendência a RUIM, para aquela região.

5.6 Validação do dispositivo

A Prefeitura do Rio de Janeiro disponibiliza os dados da qualidade do ar de diferentes regiões da cidade por meio do portal JEAP¹. Neste trabalho optou-se em avaliar a região de Campo Grande, pois é uma região próxima as de interesse, Recreio dos Bandeirantes e a zona industrial de Santa Cruz, que não são monitoradas pelo governo.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos pelo sistema e comparados com os dados fornecidos pelo portal da prefeitura. Todas as medições foram realizadas no mesmo dia (23/01/2023). As três primeiras medições ocorreram na Pça D. Afonso Henriques, com coordenadas 22°54' 13.9" S 43° 32' 49.8", enquanto as 3 ultimas medições ocorreram na Pça D. João Bosco, com coordenadas 22°52'31.0"S 43°33'09.8"W.

Tabela 5.6: Comparação do sistema proposto com os dados fornecidos pela prefeitura do Rio de Janeiro por meio do portal JEAP¹

| Voo | Início | Fim | Altitude | Local | Proposto | JEAP |
|-----|--------|-------|-----------|-------------------|-------------------------|------|
| 1 | 10:00 | 10:20 | 15 metros | Pça D. Afonso | Muito Boa a Boa - 1,05 | Boa |
| 2 | 11:00 | 11:20 | 10 metros | Pça D. Afonso | Boa a Média - 3,56 | Boa |
| 3 | 12:00 | 12:20 | 10 metros | Pça D. Afonso | Média ou moderada- 5,35 | Boa |
| 4 | 14:00 | 14:15 | 15 metros | Pça D. João Bosco | Boa a Média -3,84 | Boa |
| 5 | 15:00 | 15:15 | 10 metros | Pça D. João Bosco | Boa a Muito Boa -1,10 | Boa |
| 6 | 17:00 | 17:15 | 10 metros | Pça D. João Bosco | Boa- 3,09 | Boa |

Como pode ser observado, os resultados obtidos pelo sistema proposto estão condizentes com os dados fornecidos pelo sistema oficial do governo, demonstrando que o sistema apresenta resultados interessantes, principalmente por permitir medições contínuas no decorrer do dia.

¹<http://jeap.rio.rj.gov.br/je-metinfosmac/boletim>

5.7 Análise e Discussão sobre os Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos para o monitoramento da região do Recreio dos Bandeirantes e de Santa Cruz ambas no Rio de Janeiro.

Cabe salientar que o tempo de amostragem para captura dos poluentes neste trabalho foi mais curto quando comparado com o tempo de amostragem de estações ambientais, sendo o valor, para o padrão primário, de cerca de oito horas. Apesar do tempo curto, a capacidade de altitude do VANT e a disposição dos sensores no mesmo possibilitou ter uma captura das partículas nos ambientes com níveis compatíveis para tomadas de decisão, seguindo a resolução CONAMA no 491/2018.

5.7.1 Análise sobre o ambiente Recreio dos Bandeirantes-RJ

Para a análise da qualidade do ar no ambiente do Recreio dos Bandeirantes-RJ, foram realizadas três medições, conforme visto na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Voos realizados na região do Recreio dos Bandeirantes/RJ. (Fonte: Próprio autor)

| Voo | Data | Hora início | Hora Fim | Altitude | Gases | Partículas |
|-----|------------|-------------|----------|-----------|-------|------------|
| 1 | 20/02/2021 | 11:00 | 11:20 | 15 metros | ok | ok |
| 2 | 21/02/2021 | 11:00 | 11:20 | 10 metros | ok | baixa |
| 3 | 22/02/2021 | 14:00 | 14:20 | 15 metros | ok | baixa |

Como pode ser observado pela Tabela 5.7, apenas no primeiro voo pôde-se obter dados completos. No segundo voo, só se pôde obter dados dos gases, com baixa obtenção de dados de partícula. Já no terceiro, somente se obteve dados dos gases. Isso se deve ao fato de a área ser de baixa produção de partículas e de gases. Conforme já mencionado, é uma região sem presença de indústrias. O horário escolhido para o primeiro e segundo voo diz respeito a hora de maior movimento de veículos e pessoas na região. No terceiro voo, buscou-se um horário de baixo movimento.

A Figura 5.9 apresenta a tabela final, após a segunda etapa de tratamento, com os dados de entrada para ser aplicada a abordagem Fuzzy.

A partir da Figura 5.9 pode-se observar que a quantidade de dados foi menor do que nos testes de validação. Isso deve-se justamente ao fato de que, nas medições, a obtenção de gases junto com as partículas foi menor, no entanto, tal fato não interfere significativamente para a aplicação da abordagem fuzzy.

A Figura 5.10 apresenta o resultado obtido pela aplicação das técnicas fuzzy. Conforme visto, as saídas da fuzzificação produziram resultados com qualidade do ar bem baixa. No Caso do MATLAB, a saída foi 0,21 e do JAVA 0,23. Ambas saídas, após a etapa de defuzzificação, indicam que a qualidade do ar nesse ambiente é qualificada como MBOA, ou muito boa.

A fim de apresentar confirmação dessa qualificação, pode-se ver a Figura 5.11 que apresenta

| | count | mean | std | min | 25% | 50% | 75% | max |
|-----------------|-------|------------|-----------|-------|---------|---------|----------|--------|
| segundo | 36.0 | 25.944444 | 0.410188 | 25.0 | 26.000 | 26.000 | 26.0000 | 27.00 |
| Temp | 36.0 | 95.000000 | 0.000000 | 95.0 | 95.000 | 95.000 | 95.0000 | 95.00 |
| Umidade | 36.0 | 259.861111 | 9.502339 | 244.0 | 254.000 | 256.000 | 269.0000 | 278.00 |
| CO2 | 36.0 | 261.666667 | 2.878492 | 257.0 | 260.750 | 261.000 | 262.0000 | 270.00 |
| CO | 36.0 | 0.389722 | 2.338333 | 0.0 | 0.000 | 0.000 | 0.0000 | 14.03 |
| PM10 | 36.0 | 26.679722 | 16.650006 | 0.0 | 14.005 | 15.475 | 38.0725 | 73.30 |
| PM25 | 36.0 | 0.167222 | 1.003333 | 0.0 | 0.000 | 0.000 | 0.0000 | 6.02 |
| ConcPM1 | 36.0 | 0.055000 | 0.033764 | 0.0 | 0.030 | 0.030 | 0.0775 | 0.15 |
| ConcPM25 | 36.0 | 0.066389 | 0.398333 | 0.0 | 0.000 | 0.000 | 0.0000 | 2.39 |

Figura 5.9: Dados .csv da área do Recreio dos Bandeirantes/RJ após o pré-processamento. (Fonte: o próprio autor).

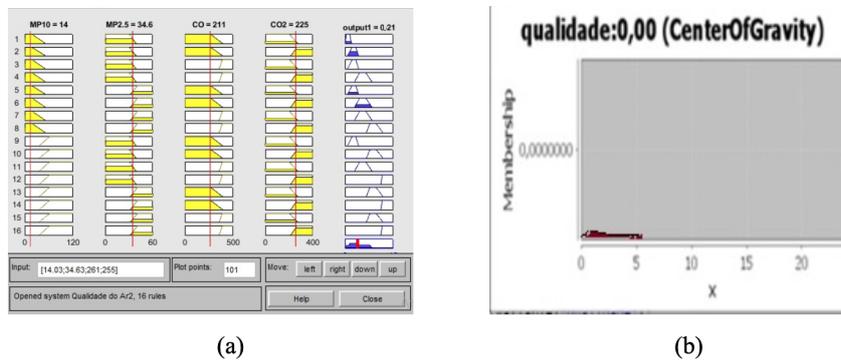


Figura 5.10: Saídas após fuzzificação dos dados obtidos pelas bibliotecas do MATLAB (a) e do JAVA (b) para a região do Recreio dos Bandeirantes/RJ. (Fonte: o próprio autor)

uma relação entre a dispersão de partículas e a pressão atmosférica. Percebe-se alguns outliers que podem ser resultado de algum erro de medição dos sensores, mas o comportamento mais significativo mostra um comportamento quase uniforme dos níveis de CO₂ com uma pressão atmosférica média de 101,2KPa.

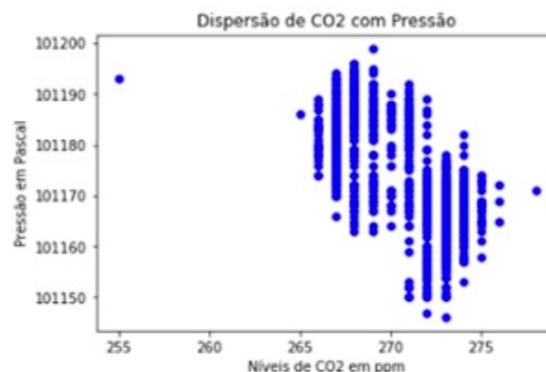


Figura 5.11: Indicativo de dispersão de CO₂ pela pressão atmosférica na região do Recreio dos Bandeirantes/RJ. (Fonte: o próprio autor)

Analisando a Figura 5.12 (a) e (b), percebe-se que a dispersão de partículas e de CO₂ se encontram dentro dos limites definidos pelo padrão CONAMA que definem a área como BOA para

ambiente em céu aberto (outdoor), na qualificação de qualidade do ar, confirmando o resultado das etapas de fuzzyficação e defuzzyficação.

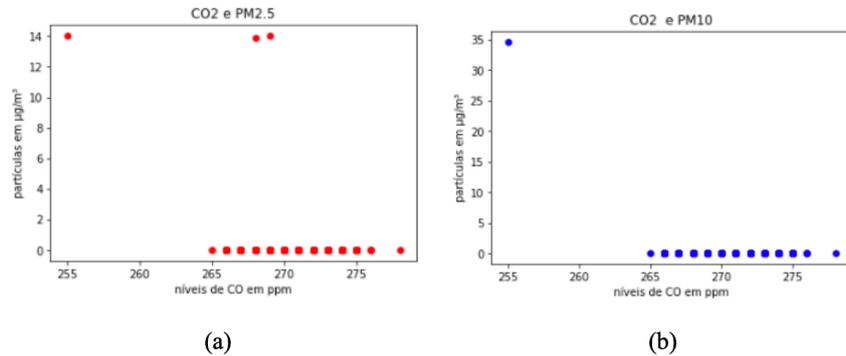


Figura 5.12: Dispersão de CO₂ e PM_{2.5} (a) e CO₂ e PM₁₀ em vermelho, apresentando a baixa indicação de partículas na região do Recreio dos Bandeirantes/RJ (Fonte: o próprio autor).

Por todos os gráficos apresentados, nota-se que a dispersão de CO₂ no ambiente menos poluído é baixa, com pequenas variações. O gráfico foi obtido com os dados de 11h da manhã, o que justifica pequenos picos de CO₂ no ar, mas, mesmo assim, comparados com dados da área mais poluída, os índices se mostram baixos e dentro do que a Resolução do CONAMA indica como não prejudicial à saúde humana.

5.7.2 Análise sobre o ambiente Santa Cruz-RJ

Para a análise da qualidade do ar no ambiente do Santa Cruz-RJ, também foram realizadas três medições, conforme pode ser visto na Tabela 5.8. Diferente do ambiente anterior, nessa área obteve-se dados mais complexos em todas as três medições. Os horários escolhidos pelos três voos foram os mesmos em ambas as regiões.

Tabela 5.8: Monitoramentos realizados com VANT realizados em área de Santa-Cruz-RJ. (Fonte: Próprio autor)

| Voo | Data | Hora início | Hora Fim | Altitude | Gases | Partículas |
|-----|------------|-------------|----------|-----------|-------|------------|
| 1 | 16/11/2021 | 11:00 | 11:20 | 15 metros | ok | ok |
| 2 | 17/11/2021 | 11:00 | 11:20 | 10 metros | ok | ok |
| 3 | 18/11/2021 | 14:00 | 14:20 | 15 metros | ok | ok |

Na Figura 5.13, pode-se observar os dados de qualidade do ar da região já preparados para serem inseridos nos controladores MATLAB e JAVA, a fim de obter o resultado da fase de fuzzyficação em ambos os tipos de controladores. Percebe-se que, nesse ambiente, os dados indicam maior presença de gás CO e CO₂ e de partículas PM₁₀ e PM_{2.5}, o que indica ser essa região uma área de qualidade do ar mais prejudicial ao ser humano.

A Figura 5.14 os resultados obtidos pela aplicação da abordagem fuzzy nos dados pré-processados para a região de Santa Cruz/RJ.

| | count | mean | std | min | 25% | 50% | 75% | max |
|----------|-------|--------------|-----------|-----------|-------------|------------|-------------|-----------|
| segundo | 40.0 | 20.50000 | 11.690452 | 1.00 | 10.7500 | 20.500 | 30.2500 | 40.00 |
| CO | 40.0 | 135.82500 | 19.100124 | 125.00 | 126.0000 | 127.500 | 132.2500 | 209.00 |
| CO2 | 40.0 | 364.97500 | 25.915531 | 342.00 | 348.0000 | 353.000 | 368.7500 | 437.00 |
| PM10 | 40.0 | 47.63775 | 51.780151 | 15.76 | 15.8200 | 33.780 | 57.1625 | 270.00 |
| PM25 | 40.0 | 44.88375 | 50.280718 | 15.75 | 15.8175 | 25.870 | 46.1225 | 254.17 |
| ConcPM1 | 40.0 | 20.43625 | 22.213829 | 6.76 | 6.7900 | 14.495 | 24.5200 | 115.83 |
| ConcPM25 | 40.0 | 0.08825 | 0.106984 | 0.00 | 0.0300 | 0.040 | 0.0975 | 0.53 |
| Pressao | 40.0 | 101167.22500 | 13.531516 | 101145.00 | 101155.7500 | 101166.000 | 101174.2500 | 101194.00 |
| Temp | 40.0 | 28.70750 | 0.346697 | 27.90 | 28.7000 | 28.800 | 28.9000 | 29.10 |

Figura 5.13: Dados .csv da área de Santa Cruz/RJ após o pré-processamento. (Fonte: o próprio autor).

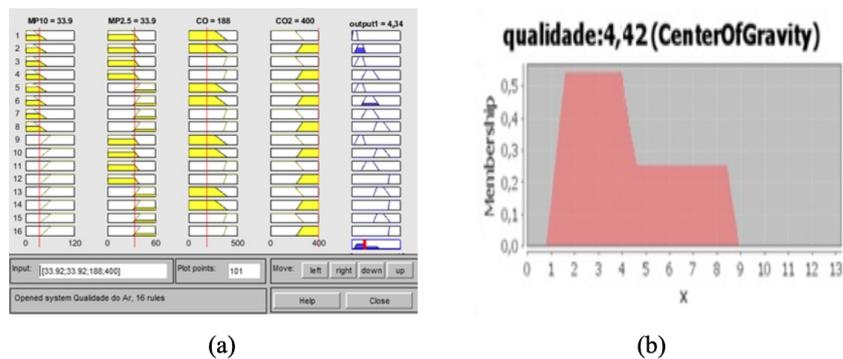


Figura 5.14: Saídas após fuzzyficação dos dados por meio das bibliotecas do MATLAB (a) e do JAVA (b) para a região de Santa Cruz/RJ. (Fonte: o próprio autor).

Conforme visto, as saídas da fuzzyficação produziram resultados com qualidade do ar bem baixa. No caso do MATLAB, a saída foi 4,34 e do JAVA 4,42. Ambas saídas, após a etapa de defuzzyficação, indicam que a qualidade do ar nesse ambiente é qualificada como MÉDIA, mas com tendência a RUIM. Resultado preocupante para os órgãos fiscalizadores. Visando a confirmação dessa qualificação, pode-se avaliar os gráficos ilustrados nas Figuras 5.15 e 5.16 que apresentam a relação entre a dispersão de CO e CO₂, e a pressão atmosférica.

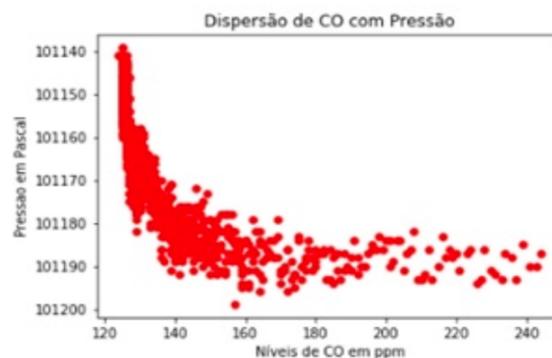


Figura 5.15: Dispersão de CO e Pressão atmosférica na região de Santa Cruz/RJ (Fonte: o próprio autor).

Na Figura 5.16, a concentração de CO é maior em baixa altitude. Na Figura 5.15, a dispersão de CO₂ ao longo da altitude (que é apresentada pela característica da pressão atmosférica) se

apresenta mais concentrada nessa região, indicando índices de poluição nociva mais elevadas que os apresentados na região anterior.

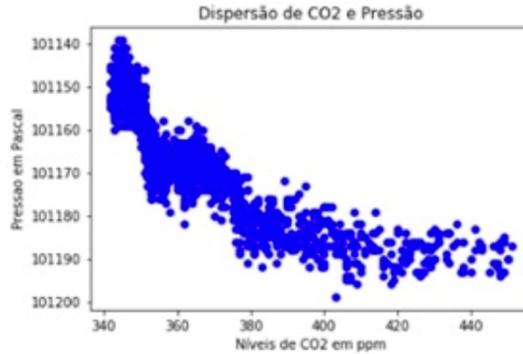


Figura 5.16: Dispersão de CO₂ e Pressão atmosférica na região de Santa Cruz/RJ (Fonte: o próprio autor).

Na Figura 5.17 verifica-se maior concentração de partículas com concentração de CO₂ de 364 ppm em pouco tempo de sondagem, no qual observa-se um nível alto de CO₂. Esse gráfico expressa os níveis de PM_{2.5} inaláveis de 0 a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e prejudiciais à saúde humana, com partículas acima de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para Média Aritmética Anual, de acordo com o CONAMA.

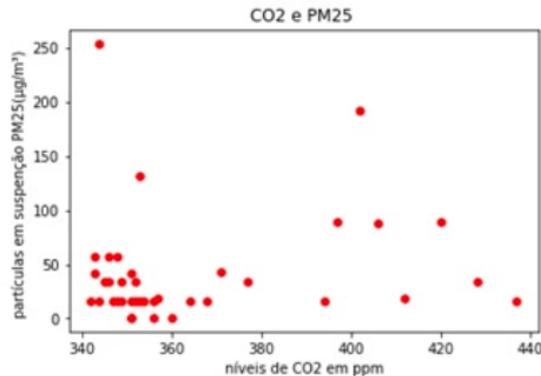


Figura 5.17: Concentração de CO₂ com partículas em suspensão PM_{2.5} na região de Santa Cruz/RJ (Fonte: o próprio autor).

Os valores acima de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, com partículas de 200 e 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, em pouco tempo de obtenção de dados são indicativos de uma área poluída por indicarem níveis de alerta, conforme resolução CONAMA no 491/2018 [CONAMA, 2018]. Esses níveis também foram observados no trabalho de [Zareb et al., 2021], destacando a concentração de PM₁₀ em 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em uma área urbana na qual foram realizados sobrevoos, próximo a entrada da universidade de Máscara, na Argélia.

Capítulo 6

Considerações finais e trabalhos futuros

O monitoramento da quantidade e do comportamento dos poluentes na atmosfera é fundamental para a toda a sociedade. A partir desse monitoramento é possível determinar a qualidade do ar, permitindo que as autoridades tomem decisões em relação ao planejamento de uma cidade em relação a infraestrutura, instalação de indústrias, bem como na determinação de investimentos em saúde etc.

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo, capaz de auxiliar na determinação da qualidade do ar. Os principais diferenciais do dispositivo desenvolvido consistem, além da quantidade maior de parâmetros ambientais monitorados em relação a outros encontrados na literatura, o seu peso reduzido que permite que ele seja acoplado a Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS). As avaliações demonstraram que o dispositivo consegue capturar facilmente os dados de ar, mostrando-se eficiente, sem falhas ou dificuldades maiores na aquisição de dados.

Além do dispositivo, este trabalho apresentou uma abordagem de lógica fuzzy para qualificar o ar, baseada em critérios fornecidos pela legislação vigente. Tal abordagem foi implementada em uma estação-base, onde foram realizadas as análises dos dados capturados pelo dispositivo proposto.

O sistema constituído pelo dispositivo de baixo custo e pela abordagem fuzzy foi avaliado com o monitoramento de três localidades na cidade do Rio de Janeiro, nos bairros de Campo Grande, do Recreio dos Bandeirantes e Santa Cruz. O bairro de Campo Grande foi utilizado como estudo para validação do sistema, pois o monitoramento da qualidade do ar desta região é realizada pela prefeitura, sendo os dados atualizados e disponibilizados diariamente na Internet. Os outros dois bairros não possuem sistema de monitoramento, enquanto o bairro de Santa Cruz caracteriza-se pela alta atividade industrial, sendo definida como o polo industrial da cidade, o bairro do Recreio dos Bandeirantes é uma região mais residencial, sendo uma região litorânea.

Os testes de validação realizados no bairro de Campo Grande mostraram similaridade com os dados disponibilizados pela Prefeitura, demonstrando que apesar dos sensores utilizados pelo sistema não serem os mais precisos do mercado, eles conseguem capturar os dados dos parâmetros do ar de maneira .

Os testes realizados na área industrial mostraram acúmulo de gases com a sondagem do VANT em baixas altitudes, com a quantidade de material particulado encontrado principalmente com ordem de grandeza em $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estando na faixa de alerta para os indicadores de monitoramento ambiental. Embora não se tenha encontrado grande quantidade de partículas com ordem de grandeza acima dos $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para um padrão primário de exposição até oito horas, permitiu-se avaliar o gradiente espacial dessa grandeza fora do normal, mesmo com um tempo de amostragem menor, o que confirma a existência de tais partículas. A análise foi confirmada quando se constatou um elevado nível de CO₂ em torno de 344ppm. Salienta-se que o nível elevado desse gás ocorre devido ao acúmulo de partículas provenientes da queima de combustível fóssil, provavelmente, proveniente das indústrias da região.

A avaliação do ambiente litorâneo, apresentou nível de CO também variável. Esse nível, embora na média de concentração aceitável para um ambiente externo, apresenta rápidas variações em altitude, o que demonstra atividade do gradiente espacial desse gás naquela região. Apesar da definição de qualidade do ar empregar fatores somáticos como variação térmica, umidade relativa, dentre outros, os índices de poluentes do ar foram bem classificados com o algoritmo proposto. Os termos linguísticos escolhidos para a saída do algoritmo tiveram uma boa validação com os níveis de entrada.

Na pesquisa, constatou-se discrepância quanto aos níveis de poluentes atmosféricos registrados, principalmente ao material particulado com partículas inaláveis PM₁₀ e PM_{2.5}, presentes no ambiente industrial e que demonstram risco à saúde, demonstrando a importância do monitoramento da qualidade do ar.

6.1 Trabalhos Futuros

Como proposta de trabalhos futuros, pode-se desenvolver um algoritmo baseado em inteligência artificial que permita que o VANT, a partir de valores monitorados pelos sensores em tempo real, seja direcionado para a área de maior concentração dos poluentes, permitindo assim uma descrição mais precisa da qualidade do ar.

A utilização de sistemas de comunicação sem fio é uma outra melhoria a ser incorporada ao sistema. O uso de comunicação por meio de redes sem fio, como wifi ou LoRa, pode fornecer uma maior abrangência e alcance do sistema.

A avaliação de diferentes abordagens de algoritmos fuzzy, bem como de outros algoritmos de aprendizado de máquina, podem fornecer resultados ainda mais precisos, permitindo que o sistema seja incorporado em sistemas de gestão do governo para fiscalização de empresas etc.

Referências Bibliográficas

- Abraham, S. and Li, X. [2016]. Design of a low-cost wireless indoor air quality sensor network system, *International Journal of Wireless Information Networks* **23**: 57–65.
- Acampora, G., Loia, V., Lee, C.-S. and Wang, M.-H. [2013]. *On the power of fuzzy markup language*, Springer.
- Al Tahtawi, A. R., Andika, E., Yusuf, M. and Harjanto, W. N. [2019]. Design of quadrotor uav and internet-of-things based air pollution monitoring systems, *IJITEE (International Journal of Information Technology and Electrical Engineering)* **3**(4): 120–127.
- Albino, V., Berardi, U. and Dangelico, R. M. [2015]. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives, *Journal of urban technology* **22**(1): 3–21.
- Altstädter, B., Platis, A., Wehner, B., Scholtz, A., Wildmann, N., Hermann, M., Käthner, R., Baars, H., Bange, J. and Lampert, A. [2015]. Aladina—an unmanned research aircraft for observing vertical and horizontal distributions of ultrafine particles within the atmospheric boundary layer, *Atmospheric Measurement Techniques* **8**(4): 1627–1639.
- Alvear, O., Zema, N. R., Natalizio, E. and Calafate, C. T. [2017]. Using uav-based systems to monitor air pollution in areas with poor accessibility, *Journal of Advanced Transportation* **2017**.
- ANAC [2021]. Agência Nacional de Aviação Civil: Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil.
URL: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94>
- Ángel, L. S. M., Jairo, P. C., Alberto, R. N. R. and María, V. R. X. [2019]. Determination of the concentration of pm10 particulate matter in areas of the universidad del atlántico by using a sensor arranged in an unmanned aerial vehicle, *2019 Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Pública (CASP)*, IEEE, pp. 1–7.
- Angrisani, L., Amodio, A., Arpaia, P., Asciolla, M., Bellizzi, A., Bonavolontà, F., Carbone, R., Caputo, E., Karamanolis, G., Martire, V. et al. [2019]. An innovative air quality monitoring system based on drone and iot enabling technologies, *2019 IEEE international workshop on metrology for agriculture and forestry (MetroAgriFor)*, IEEE, pp. 207–211.

- Arias-Pérez, R. D., Taborda, N. A., Gómez, D. M., Narvaez, J. F., Porras, J. and Hernandez, J. C. [2020]. Inflammatory effects of particulate matter air pollution, *Environmental Science and Pollution Research* **27**(34): 42390–42404.
- Babaan, J., Ballori, J., Tamondong, A., Ramos, R. and Ostrea, P. [2018]. Estimation of pm 2.5 vertical distribution using customized uav and mobile sensors in brgy. up campus, diliman, quezon city, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **42**: 89–103.
- Beltran, G. B., Yamaguchi, N. U., Bergamasco, R. and Sakiyama, R. Z. [2020]. Desenvolvimento de uma plataforma sem fio para monitoramento dos níveis de co2 na atmosfera, *Brazilian Journal of Development* **6**(6): 39546–39567.
- Berman, E. S., Fladeland, M., Liem, J., Kolyer, R. and Gupta, M. [2012]. Greenhouse gas analyzer for measurements of carbon dioxide, methane, and water vapor aboard an unmanned aerial vehicle, *Sensors and Actuators B: Chemical* **169**: 128–135.
- Bonanno, D., Nock, K., Smith, L., Elmore, P. and Petry, F. [2017]. An approach to explainable deep learning using fuzzy inference, *Next-Generation Analyst V*, Vol. 10207, SPIE, pp. 132–136.
- Boubel, R. W., Vallero, D., Fox, D. L., Turner, B. and Stern, A. C. [2013]. *Fundamentals of air pollution*, Elsevier.
- Brady, J. M., Stokes, M. D., Bonnardel, J. and Bertram, T. H. [2016]. Characterization of a quadrotor unmanned aircraft system for aerosol-particle-concentration measurements, *Environmental science & technology* **50**(3): 1376–1383.
- Camastra, F., Ciaramella, A., Giovannelli, V., Lener, M., Rastelli, V., Staiano, A., Staiano, G. and Starace, A. [2015]. A fuzzy decision system for genetically modified plant environmental risk assessment using mamdani inference, *Expert Systems with Applications* **42**(3): 1710–1716.
- CETESB [2020]. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo: Ficha de Informação toxicológica. **URL:** <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/07/Mono%CC%81xido-de-carbono.pdf>
- Chang, C.-C., Chang, C.-Y., Wang, J.-L., Lin, M.-R., Ou-Yang, C.-F., Pan, H.-H. and Chen, Y.-C. [2018]. A study of atmospheric mixing of trace gases by aerial sampling with a multi-rotor drone, *Atmospheric Environment* **184**: 254–261.
- Chiliński, M. T., Markowicz, K. M. and Kubicki, M. [2018]. Uas as a support for atmospheric aerosols research: Case study, *Pure and Applied Geophysics* **175**(9): 3325–3342.

- Ciani, F., Rimondi, V. and Costagliola, P. [2021]. Atmospheric mercury pollution: The current methodological framework outlined by environmental legislation, *Air Quality, Atmosphere & Health* **14**(10): 1633–1645.
- Cingolani, P. and Alcalá-Fdez, J. [2012]. jfuzzylogic: a robust and flexible fuzzy-logic inference system language implementation, *2012 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, IEEE, pp. 1–8.
- CONAMA [1990]. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Resolução CONAMA nº 3/1990, de 28 de junho de 1990.
URL: <https://www.ibram.df.gov.br/images/resol03.pdf>
- CONAMA [2018]. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Resolução CONAMA nº 491/2018, de 19 de novembro de 2018.
URL: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=369516>
- Corrigan, C., Roberts, G., Ramana, M., Kim, D. and Ramanathan, V. [2008]. Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the indian ocean using autonomous unmanned aerial vehicles, *Atmospheric Chemistry and Physics* **8**(3): 737–747.
- da Paixão, G. P. G. and da Silva, C. M. [2021]. Impactos da poluição atmosférica no processo de polinização das abelhas: cidade do rio de janeiro, *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais* **12**(3): 90–101.
- DATASHEET, P. [2018]. *Micro SD Data Sheet*.
URL: <https://5.imimg.com/data5/YP/WB/MY-1833510/micro-sd-card-module-for-arduino.pdf>
- do Rio de Janeiro, P. [2022]. *Indicador de qualidade do Ar no Rio de Janeiro (IAQ)*.
URL: <http://jeap.rio.rj.gov.br/je-metinfosmac/boletim>
- Dutra Fagundes, J., Moiano de Paula, G., Lago, I., Augusto Streck, N. and Antônio Bisognin, D. [2010]. *Aquecimento global: efeitos no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade de batata*, Ci. Rural .
- Fadzly, M., Rosli, M., Amarul, T., Effendi, M. et al. [2020]. *Smart air quality monitoring system using arduino mega*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 864, IOP Publishing, p. 012215.
- Fladeland, M., Sumich, M., Lobitz, B., Kolyer, R., Herlth, D., Berthold, R., McKinnon, D., Monforton, L., Brass, J. and Bland, G. [2011]. *The nasa sierra science demonstration programme and the role of small–medium unmanned aircraft for earth science investigations*, *Geocarto International* **26**(2): 157–163.

- Fransiska, R., Septia, E., Vessabhu, W., Frans, W., Abednego, W. et al. [2013]. *Electrical power measurement using arduino uno microcontroller and labview*, 2013 3rd international conference on instrumentation, communications, information technology and biomedical engineering (ICICI-BME), *IEEE*, pp. 226–229.
- Freitas, S. R., Longo, K. M., Dias, M. and Dias, P. [2005]. *Emissões de queimadas em ecossistemas da américa do sul*, *Estudos avançados* **19**: 167–185.
- Gu, Q., R. Michanowicz, D. and Jia, C. [2018]. *Developing a modular unmanned aerial vehicle (uav) platform for air pollution profiling*, *Sensors* **18**(12): 4363.
- Guide, F. L. T. U. [2017]. *The math works inc.*
- Illingworth, S., Allen, G., Percival, C., Hollingsworth, P., Gallagher, M., Ricketts, H., Hayes, H., Ładosz, P., Crawley, D. and Roberts, G. [2014]. *Measurement of boundary layer ozone concentrations on-board a skywalker unmanned aerial vehicle*, *Atmospheric Science Letters* **15**(4): 252–258.
- INEA [2021]. *Instituto Estadual do Meio Ambiente: Ar, Água e Solo*.
URL: <http://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/qualidade-do-ar/poluentes-atmosfericos/>
- Jumaah, H. J., Kalantar, B., Halin, A. A., Mansor, S., Ueda, N. and Jumaah, S. J. [2021]. *Development of uav-based pm_{2.5} monitoring system*, *Drones* **5**(3): 60.
- Lawrence, D. A. and Balsley, B. B. [2013]. *High-resolution atmospheric sensing of multiple atmospheric variables using the datahawk small airborne measurement system*, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **30**(10): 2352–2366.
- Lee, J., Park, S. and Kim, T. [2020]. *Development of a ventilation system using window cavity*, *Sustainability* **12**(20): 8391.
- Lin, C., Weng, C.-E., Yuan, C.-S., Lee, C.-W., Hung, C.-H., Bui, X.-T., Lo, K.-C., Lin, J.-X. et al. [2018]. *Vertical stratification of volatile organic compounds and their photochemical product formation potential in an industrial urban area*, *Journal of environmental management* **217**: 327–336.
- Liu, S., Yang, X. and Zhou, X. [2021]. *Development of a low-cost uav-based system for ch₄ monitoring over oil fields*, *Environmental Technology* **42**(20): 3154–3163.
- Mamdani, E. H. and Assilian, S. [1975]. *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*, *International journal of man-machine studies* **7**(1): 1–13.

- Marques, G., Saini, J., Dutta, M., Singh, P. K. and Hong, W.-C. [2020]. *Indoor air quality monitoring systems for enhanced living environments: A review toward sustainable smart cities*, Sustainability **12**(10): 4024.
- Mayer, S., Sandvik, A., Jonassen, M. O. and Reuder, J. [2012]. *Atmospheric profiling with the uas sumo: a new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models*, Meteorology and Atmospheric Physics **116**: 15–26.
- Montoya, J. M., Olsson, A., Mårtensson, S.-G. and Chilo, J. [2020]. *Drone gas concentration measurement system for landfills*, 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, pp. 1–5.
- Pires, D. O. [2005]. *Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para a poluição do ar na região metropolitana do Rio de Janeiro*, PhD thesis, UFRN.
URL: <http://www.ppe.ufrj.br/production/tesis/dopires.pdf> (Acessado em 12/01/07)
- Project, T. W. A. Q. [2021]. *World's Air Pollution: Real time Air Quality Index*.
URL: <https://waqi.info/c/-14.497/-62.317/4.2z>
- Quezada, J., Flores, E., Solís, A. and Quezada, V. [2014]. *Iec-61131 controladores programables*, Revistas y Boletines Científicos **3**(5).
- Ramana, M., Ramanathan, V., Kim, D., Roberts, G. and Corrigan, C. [2007]. *Albedo, atmospheric solar absorption and heating rate measurements with stacked uavs*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography **133**(629): 1913–1931.
- Ramanathan, V. [2006]. *Maldives auav campaign (mac): Observing aerosol-cloud-radiation-climate interactions simultaneously from three stacked autonomous unmanned aerial vehicles (auavs)*, Technical report, Report of the Field Campaign Held from March.
- Reuder, J., Jonassen, M. O. and Ólafsson, H. [2012]. *The small unmanned meteorological observer sumo: Recent developments and applications of a micro-uas for atmospheric boundary layer research*, Acta Geophysica **60**: 1454–1473.
- Rohi, G., Ofualagba, G. et al. [2020]. *Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones*, Heliyon **6**(1): e03252.
- Ruiz-Jimenez, J., Zanca, N., Lan, H., Jussila, M., Hartonen, K. and Riekkola, M.-L. [2019]. *Aerial drone as a carrier for miniaturized air sampling systems*, Journal of Chromatography A **1597**: 202–208.

- Sakhvidi, M. J. Z., Lequy, E., Goldberg, M. and Jacquemin, B. [2020]. *Air pollution exposure and bladder, kidney and urinary tract cancer risk: A systematic review*, *Environmental Pollution* **267**: 115328.
- Schirmer, W. N. and Gauer, M. A. [2012]. *Os biocombustíveis no brasil: panorama atual, emissões gasosas e os métodos analíticos de monitoramento da qualidade do ar referente a gases de natureza orgânica* *biofuels in brazil: the current scene, gaseous emissions and analytical methods on air*, *Ambiência* **8**(1): 139–157.
- Simões, M. G. and Shaw, I. S. [2007]. *Controle e modelagem fuzzy*, Editora Blucher.
- Šmídl, V. and Hofman, R. [2013]. *Tracking of atmospheric release of pollution using unmanned aerial vehicles*, *Atmospheric Environment* **67**: 425–436.
- SODRÉ, C. F. L., Silva, Y. J. A. and MONTEIRO, I. P. [2016]. *Acidificação dos oceanos: fenômeno, consequências e necessidades de uma governança ambiental global*, *Revista Científica do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNB* **1**(4).
- Sokač, M., Đurasek, P., Bačić, I. and Puškarić, S. [2016]. *Uav application in ecology: Data collecting with quad-copter equipped with arduino based measurement platform*, 2016 International Symposium ELMAR, *IEEE*, pp. 233–236.
- Takahashi, A. and Bedregal, B. [2006]. *T-normas, t-conormas, complementos e implicações intervalares*, *Trends in Computational and Applied Mathematics* **7**(1): 139–148.
- Thu, M. Y., Htun, W., Aung, Y. L., Shwe, P. E. E. and Tun, N. M. [2018]. *Smart air quality monitoring system with lorawan*, 2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS), *IEEE*, pp. 10–15.
- USGBC [2021]. *U.S. Green Building Council: Environmental Quality*.
URL: <https://www.usgbc.org/credits/eq12>
- Vijayakumar, P., Khokhar, A., Pal, A. and Dhawan, M. [2020]. *Air quality index monitoring and mapping using uav*, 2020 international conference on communication and signal processing (ICCSP), *IEEE*, pp. 1176–1179.
- Villa, T. F., Salimi, F., Morton, K., Morawska, L. and Gonzalez, F. [2016]. *Development and validation of a uav based system for air pollution measurements*, *Sensors* **16**(12): 2202.
- Watai, T., Machida, T., Ishizaki, N. and Inoue, G. [2006]. *A lightweight observation system for atmospheric carbon dioxide concentration using a small unmanned aerial vehicle*, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **23**(5): 700–710.

Wellenius, G., Schwartz, J. and Mittleman, M. [2015]. *Health and the environment: addressing the health impact of air pollution*, Draft resolution proposed by the delegations of Albania, Chile, Colombia, France, Germany, Monaco, Norway, Panama, Sweden, Switzerland, Ukraine, United States of America, Uruguay and Zambia. Sixty-Eighth World Health Assembly. Agenda item 14: A68.

WHO [2021]. *World health organization: Air pollution*.

URL: <https://www.who.int/health-topics/air-pollutiontab=tab1>

Wu, W., Jin, Y. and Carlsten, C. [2018]. *Inflammatory health effects of indoor and outdoor particulate matter*, *Journal of Allergy and Clinical Immunology* **141**(3): 833–844.

Xu, S., Feng, N., Liu, K., Liang, Y. and Liu, X. [2021]. *A weighted fuzzy process neural network model and its application in mixed-process signal classification*, *Expert Systems with Applications* **172**: 114642.

Ya'acob, N., Zolkapli, M., Johari, J., Yusof, A. L., Sarnin, S. S. and Asmadinar, A. Z. [2017]. *Uav environment monitoring system*, 2017 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE), *IEEE*, pp. 105–109.

Yadav, P., Porwal, T., Jha, V. and Indu, S. [2020]. *Emerging low-cost air quality monitoring techniques for smart cities with uav*, 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), *IEEE*, pp. 1–6.

Zareb, M., Bakhti, B., Bouzid, Y., Kadourbenkada, H., Bouzgou, K. and Nouibat, W. [2021]. *Novel smart air quality monitoring system based on uav quadrotor*, Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications: ICEECA 2019, 17–19 December 2019, Constantine, Algeria, *Springer*, pp. 441–454.

Zhang, Y., Zhao, B., Jiang, Y., Xing, J., Sahu, S. K., Zheng, H., Ding, D., Cao, S., Han, L., Yan, C. et al. [2022]. *Non-negligible contributions to human health from increased household air pollution exposure during the covid-19 lockdown in china*, *Environment International* **158**: 106918.