



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALINE MARA OLIVEIRA

DETECÇÃO DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS EM AMBIENTES INTERNOS
USANDO NANOQUADRICÓPTEROS

UBERLÂNDIA – MG
2024

ALINE MARA OLIVEIRA

DETECÇÃO DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS EM AMBIENTES INTERNOS
USANDO NANOQUADRICÓPTEROS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de doutora em Ciências.

Banca Examinadora:

Gabriela Vieira Lima, Dra. (Orientadora) - UFU

Aniel Silva de Moraes, Dr. (Coorientador) - UFU

Daniel Costa Ramos, Dr. - UFU

Luís Cláudio Oliveira Lopes, Dr. - UFU

Aline Fernanda Bianco Mattioli, Dra. - CEFET-MG

Henrique José Avelar, Dr. - CEFET-MG

UBERLÂNDIA – MG

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48 2024	<p>Oliveira, Aline Mara, 1986- Detecção de compostos orgânicos voláteis em ambientes internos usando nanoquadricópteros [recurso eletrônico] / Aline Mara Oliveira. - 2024.</p> <p>Orientadora: Gabriela Vieira Lima. Coorientador: Aniel Silva de Moraes. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.443 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Lima, Gabriela Vieira, 1990- , (Orient.). II. Moraes, Aniel Silva de, 1979- , (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
-------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 336, PPGEELT				
Data:	Vinte e oito de junho de dois mil e vinte e quatro	Hora de início:	08h00	Hora de encerramento:	11h00
Matrícula do Discente:	11923EEL009				
Nome do Discente:	Aline Mara Oliveira				
Título do Trabalho:	Detecção de compostos orgânicos voláteis em ambientes internos usando nanoquadricópteros				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Aniel Silva de Moraes. Título do projeto: Controle Cooperativo de Enxame de Veículos Aéreos não Tripulados Especializados no Monitoramento e Detecção de Falhas na Indústria 4.0. Agência financiadora: CNPq. Número do processo na agência financiadora: 403054/2021-4. Vigência do projeto: 17/03/2022 a 31/03/2025.				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Professores Doutores: Daniel Costa Ramos (UFU), Luís Cláudio Oliveira Lopes (FEQUI), Aline Fernanda Bianco Mattioli (CEFET), Henrique José Avelar (CEFET) e Gabriela Vieira Lima, orientadora da discente.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Dra. Gabriela Vieira Lima, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

APROVADA.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente

ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriela Vieira Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/06/2024, às 11:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Costa Ramos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/06/2024, às 11:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Claudio Oliveira Lopes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/06/2024, às 11:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aline Fernanda Bianco Mattioli, Usuário Externo**, em 28/06/2024, às 11:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Henrique José Avelar, Usuário Externo**, em 28/06/2024, às 12:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5404823** e o código CRC **C91EF21A**.

Dedico essa Tese à toda minha família, sobretudo ao meu marido Alex e às minhas adoráveis filhas, Angela e Agatha, cuja presença diária renova o significado da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por permitir-me alcançar este momento significativo em minha jornada acadêmica.

Expresso meus mais profundos agradecimentos à Professora Dra. Gabriela Vieira Lima e ao Professor Dr. Aniel Silva de Moraes por proporcionarem apoio e orientação ininterruptos ao longo desses últimos anos. A contribuição de ambos foi essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

Destaco, de maneira especial, a importância do Professor Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes em minha trajetória. Cada discussão com ele não apenas instigou profundas reflexões, mas também proporcionou aprendizado valioso e, sobretudo, a confiança necessária para seguir adiante.

Não posso deixar de expressar minha gratidão aos meus pais, Sônia e Mário, por seu constante estímulo a que eu buscasse a melhor versão de mim mesma. Agradeço, igualmente, ao meu companheiro de vida, Alex, pela sua companhia, cumplicidade e amor, fundamentais para enfrentar os desafios deste percurso acadêmico, e às minhas filhas Angela e Agatha.

Estendo meus agradecimentos a todos os colegas, professores, técnicos e colaboradores do Departamento de Engenharia Elétrica e de Controle e Automação da FEELT-UFU. Em particular, reconheço o apoio de Hermano e dos membros do grupo de pesquisa do Laboratório de Automação, Sistemas Eletrônicos e Controle (LASEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A contribuição do grupo de pesquisa do LASEC foi vital para o meu crescimento acadêmico, disponibilizando recursos e apoios técnicos fundamentais para a realização desta pesquisa.

Agradeço também ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade de aperfeiçoamento, e a todos os técnicos pelo auxílio necessário nos procedimentos junto à secretaria do programa.

Por fim, expresso minha sincera gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido. Essa assistência foi essencial para a concretização deste projeto de pesquisa.

“Ninguém nasce feito, é experimentando-nos no mundo que nós nos fazemos.”

(FREIRE, Paulo)

RESUMO

A dispersão de gases químicos representa uma séria ameaça à saúde humana, à fauna e à flora, bem como ao ecossistema em geral. Incidentes como vazamentos ou acidentes ocorridos durante a manipulação de amostras e materiais de laboratório podem levar à liberação descontrolada de substâncias perigosas ou explosivas. Portanto, é de suma importância que as concentrações de gases sejam monitoradas rigorosamente em ambientes onde tais substâncias são manuseadas, transportadas ou armazenadas. A tecnologia de sensores de gás tem avançado rapidamente nos últimos anos, proporcionando soluções cada vez mais precisas e confiáveis para o monitoramento de gases. No entanto, ainda enfrenta desafios significativos, especialmente quando esses sensores são implantados em veículos aéreos não tripulados (VANTs). O presente trabalho visa avaliar a eficácia dessa abordagem para a detecção de gases em locais fechados de difícil acesso ou que representem riscos à segurança humana. A solução proposta emprega uma estratégia de identificação de fontes de odor, baseada em mapeamento tridimensional da distribuição de gases. Durante os experimentos foram usadas aeronaves tipo nanoquadricóptero modelo Crazyflie 2.1 e sensores de gás semicondutor de óxido de metal modelo SGP40. Esse veículo foi escolhido por ser adequado para voos em ambientes fechados, devido ao seu baixo peso, dimensões reduzidas e facilidade para realizar manobras rápidas. Os resultados obtidos demonstram de forma clara e objetiva que a utilização de VANTs equipados com sensores de gases representam uma alternativa altamente promissora para a detecção e monitoramento de vazamentos de gases em ambientes internos.

Palavras-chave: Crazyflie 2.1, Detecção de gás, Nanoquadricóptero, VANTs, Automação, SGP40

ABSTRACT

The dispersion of chemical gases is a serious threat to human health, wildlife, flora, and the ecosystem. Incidents such as leaks or accidents during the handling of samples and laboratory materials can lead to the uncontrolled release of hazardous or explosive substances. Therefore, it is of paramount importance that gas concentrations be rigorously monitored in environments where such substances are handled, transported, or stored. Gas sensor technology has advanced rapidly in recent years, providing increasingly precise and reliable solutions for gas monitoring. However, it still faces significant challenges, especially when these sensors are deployed on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). This study aims to assess the effectiveness of this approach for gas detection in hard-to-reach or human safety-critical indoor locations. The proposed solution employs an odor source identification strategy based on three-dimensional mapping of gas distribution. During the experiments, nano quadcopters aircraft model Crazyflie 2.1 and the metal oxide semiconductor gas sensors model SGP40 were used. This vehicle was chosen for its suitability for indoor flights, given its low weight, compact dimensions, and ease of performing rapid maneuvers. The results obtained clearly and objectively show that using UAVs equipped with gas sensors is a promising alternative for detecting and monitoring indoor gas leaks.

Keywords: *Crazyflie 2.1, Gas detection, Nano Quadcopter, UAVs, Automation, SGP40*

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 -	Nanoquadricóptero Crazyflie 2.1.....	30
Figura 3.2 -	Arquitetura do Crazyflie 2.1	31
Figura 3.3 -	<i>Crazyradio</i>	32
Figura 3.4 -	Equipamentos de sistema de posicionamento local.....	34
Figura 3.5 -	Componentes do sistema de posicionamento local: (a) receptor e (b) âncora	35
Figura 3.6 -	Arranjo espacial dos nós no ambiente.....	36
Figura 3.7 -	Visão esquemática de um sensor de oxido de metal.....	37
Figura 3.8 -	Elemento sensor SGP40.....	39
Figura 3.9 -	Módulo sensor SGP40.....	40
Figura 3.10 -	Aerodinâmica do nanoquadricóptero Crazyflie.....	41
Figura 3.11 -	Aerodinâmica pelo método PIV.....	42
Figura 3.12 -	Aerodinâmica imediatamente após o início da rotação das hélices.....	43
Figura 3.13 -	CF2 equipado com <i>tag</i> do sistema de posicionamento local e o sensor de gás.....	44
Figura 3.14 -	Sistema de fonte de odor.....	47
Figura 4.1 -	Diagrama de Fluxo de Trabalho.....	49
Figura 4.2 -	Gráfico de reação do sensor de Gás SGP40 à exposição de álcool etílico absoluto	50
Figura 4.3 -	Trajectoria para Cenário 1.....	54
Figura 4.4 -	Trajectoria para Cenário 2.....	54
Figura 4.5 -	Visão geral da arquitetura do <i>firmware</i>	56
Figura 4.6 -	Fluxo de processos para medição de sinal bruto do sensor SGP40	59
Figura 4.7 -	Diagrama em blocos das etapas principais do código de voo.....	60
Figura 5.1 -	Posição 3D vs. Leitura do sensor para cenário 1 (a).....	64
Figura 5.2 -	Leitura do sensor de gás para conjunto de experimentos no cenário 1 (a)	65
Figura 5.3 -	Boxplot de erros de posição para cenário 1 (a).....	66
Figura 5.4 -	Boxplot de desvios em relação à posição estimada da fonte para cenário 1 (a).....	67

Figura 5.5 -	Posição 3D vs. Leitura do sensor para cenário 1 (b).....	68
Figura 5.6 -	Leitura do sensor de gás para conjunto de experimentos no cenário 1 (b)	68
Figura 5.7 -	Boxplot de erros de posição para cenário 1 (b).....	70
Figura 5.8 -	Boxplot de desvios em relação à posição estimada da fonte para cenário 1 (b).....	70
Figura 5.9 -	Posição 3D vs. Leitura do sensor para cenário 2	71
Figura 5.10 -	Leitura do sensor de gás para conjunto de experimentos no cenário 2	72
Figura 5.11 -	Boxplot de erros de posição para cenário 2 – Fonte 1.....	73
Figura 5.12 -	Boxplot de desvios em relação à posição estimada da fonte para cenário 2 - Fonte1.....	74
Figura 5.13 -	Boxplot de erros de posição para cenário 2 – Fonte 2.....	74
Figura 5.14 -	Boxplot de desvios em relação à posição estimada da fonte para cenário 2 – Fonte 2.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Soluções de sensores VOC integrados e suas especificações básicas.....	38
Tabela 5.1 -	Síntese do Experimento 1 em Cenário 1.....	66
Tabela 5.2 -	Síntese do Experimento 2 em Cenário 1.....	69
Tabela 5.3 -	Síntese de dados em relação à Fonte de odor 1 em Cenário 2.....	72
Tabela 5.4 -	Síntese de dados em relação à Fonte de odor 2 em Cenário 2.....	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Especificação básica do Crazyflie 2.1.	33
Quadro 3.2 - Pesquisa bibliográfica sobre fontes de odor.....	45

LISTA DE SIMBOLOS

$bthr$	Limite de detecção
μ	Média estimada das leituras na linha de base do sensor
σ	Desvio padrão dos “ <i>bouts</i> ” nos testes com ausência de gás

LISTA DE ABREVIATURAS

API	<i>Application Programming Interface</i> - Interface de Programação de Aplicações
CC	Corrente Contínua
CF2	<i>Crazyflie 2.1</i>
CPC	<i>Crazyflie Python Client</i> – Cliente Crazyflie Python
C RTP	<i>Compressed Real-Time Protocol</i> - Protocolo de Tempo Real Comprimido
DoF	<i>Degree of Freedom</i> – Graus de Liberdade
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i> – Filtro de Kalman Estendido
FreeRTOS	<i>Free Real-Time Operating System</i> - Sistema Operacional Livre de Tempo Real
GaSLAM	<i>Simultaneous Gas Localization and Mapping</i> - Localização e mapeamento simultâneo de gás
GDM	<i>Gas Distribution Mapping</i> - Mapeamento de Distribuição de Gás
GSL	<i>Gas Source Localization</i> - Localização de fonte de gás
LIDAR	<i>Laser imaging, detection, and ranging</i> - Imagem, detecção e alcance a laser
IAQ	Índice de Qualidade do Ar
IMU	Inertial Measurement Unit - Unidade de medição inercial
IoT	<i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas
IPSO	<i>Improved Particle Swarm Optimization</i> - Otimização aprimorada do enxame de partículas
MMD	<i>Mathematical Models Database</i> - Banco de dados de modelos matemáticos
MOX	<i>Metal Oxide Semiconductor</i> - Semicondutor de óxido de metal
MySQL	<i>My Structured Query Language</i> - Linguagem de Consulta Estruturada
PD	Proporcional e Derivativo
PID	<i>PhotoIonization Detector</i> - Detector de Fotoionização
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i> - Velocimetria de Imagem de Partículas
RAM	<i>Random Access Memory</i> - Memória de acesso aleatório
RAP	Robô assistente pessoal
TVOC	<i>Total volatile organic compounds</i> - Total de Compostos Orgânicos Voláteis
	Universal Assíncrono
UAVs	<i>Unmanned Aerial Vehicles</i> - Veículos aéreos não tripulados

UGVs	<i>Unmanned Ground Vehicles</i> - Veículos terrestres não tripulados
URI	<i>Uniform Resource Identifier</i> - Identificador Uniforme de Recursos
VANTs	Veículos aéreos não tripulados
VOC	<i>Volatile organic compounds</i> - <i>Compostos Orgânicos Voláteis</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Justificativas.....	14
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivos específicos.....	16
1.3 Estrutura da Tese.....	16
1.4 Publicação da autora relacionada à Tese.....	17
REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1 Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) e sua importância.....	18
2.2 A evolução dos métodos para a detecção de VOC.....	20
2.3 O uso de robôs móveis terrestres para sensoriamento de gás.....	22
2.4 O uso dos VANTs para sensoriamento de gás e sua evolução.....	25
2.5 Lacunas e oportunidades de contribuição.....	28
MATERIAIS.....	30
3.1 Design do Nanoquadricóptero.....	30
3.2 Sistema de Posicionamento.....	34
3.3 Sensor de detecção de VOC.....	37
3.4 Módulo de comunicação do CF2 com o sensor de gás.....	39
3.5 Sistema de fonte de odor.....	44
MÉTODOS.....	48
4.1 Planejamento dos Ensaios.....	48
4.2 Caracterização da resposta do sensor.....	49
4.3 Limite de Detecção.....	51
4.4 Planejamento de Trajetória.....	52
4.5 Software.....	55
4.5.1 Firmware.....	55
4.5.2 Crazyflie Java Client.....	57
4.5.3 Diretrizes de comunicação para leitura de sinal bruto.....	58
4.5.4 Interface Python.....	59
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1 Cenário 1 - Mapeamento com uma fonte de odor.....	63
5.2 Cenário 2 – Mapeamento de área ampliada com duas fontes de odor.....	71

5.3 Limitações do estudo.....	76
CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS.....	80

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A pressão regulamentar sobre a monitorização e controle de emissões industriais de poluentes atmosféricos tem estimulado os setores industriais a buscarem métodos economicamente viáveis para a vigilância contínua de suas emissões (Brinkmann *et al.*, 2018).

Nos últimos anos, os veículos aéreos têm ganhado crescente popularidade no contexto das atividades de detecção de gases graças à sua versatilidade e à capacidade de abranger áreas muito maiores em comparação com os veículos terrestres. Além disso, os avanços na pesquisa têm tornado os VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) cada vez mais úteis para aplicações comerciais (Landry, 2015). Essa tendência não só indica uma busca contínua por métodos de monitoramento mais eficazes, acompanhada pelo aumento significativo de publicações dedicadas a esse tema, mas, também, demonstra a evolução contínua da tecnologia e o aprimoramento constante das técnicas ao longo do tempo.

Paralelamente, há um aumento no interesse por estudos relacionados à localização de fontes de odor em ambientes internos utilizando veículos aéreos de pequeno porte devido ao custo cada vez mais acessível, à rápida evolução dos recursos computacionais, sensores e baterias associadas a esses veículos.

O crescente emprego da robótica móvel em diversas aplicações industriais tem inspirado muitos pesquisadores a desenvolver sensores integráveis a essas plataformas. Esses nós oferecem fontes de energia compatíveis e sistemas de comunicação avançados para transferência de dados sensoriais, seja para monitoramento ou controle (Al-Okby *et al.*, 2024). Esse crescimento pode ser atribuído ao desenvolvimento do setor comercial de fabricação de VANTs, que atualmente oferece uma variedade de drones acessíveis para grupos de pesquisa, e à disponibilidade de instrumentos de detecção química leves e de custo acessível (Burgués e Marco, 2020).

Simultaneamente, avanços significativos no *design* de sensores, aliados às melhorias na tecnologia de micro e nanofabricação e na utilização de materiais inovadores, impulsionaram o desenvolvimento de sensores de gás altamente eficientes. Essa tecnologia

avançada possibilita a miniaturização dos sensores em conjuntos microscópicos, mantendo seu alto desempenho de detecção (Nazemi *et al.*, 2019).

A pesquisa sobre a localização de fontes de odor é um campo interdisciplinar que abrange métodos de robótica, estratégias de controle cooperativo, otimização de enxames de partículas, integração de informações sensoriais em organismos vivos e desafios na química e detecção de odores (Jing *et al.*, 2021).

Conforme as definições apresentadas por Chen *et al.* (2019), a tarefa de localização da fonte de odor envolve a determinação precisa da posição de uma fonte química em um ambiente, por meio da análise da pluma, uma trilha odorífera influenciada pelas correntes de ar. O desafio fundamental está na dispersão não uniforme do odor, na qual o aroma se fragmenta em filamentos de odor, sendo afetado pela dinâmica do vento, dificultando sua detecção e rastreamento ao longo do gradiente de concentração. A aplicação de navegadores autônomos para essa tarefa é uma missão complexa devido às características singulares da dispersão do odor.

O uso de VANTs de asa rotativa, equipados com sensores de detecção de gases, surgiu como uma solução altamente promissora para medições da qualidade do ar (Zhang *et al.*, 2015). Em comparação com as aeronaves de asa fixa, os quadricópteros possuem a vantagem de realizar decolagens e pousos verticais, além de serem capazes de pairar no ar e voar tanto em espaços externos quanto internos, incluindo áreas com obstáculos (Boon *et al.*, 2017).

Apesar da excelente manobrabilidade, os quadricópteros ainda sofrem de uma variedade de deficiências que os desenvolvedores precisarão superar para que a plataforma seja realmente uma opção viável para muitas aplicações no mundo real. Por exemplo, os tempos de voo, geralmente na ordem de minutos, ainda são insuficientes para que os quadricópteros sejam veículos eficazes para todas as aplicações. Além disso, devido à sua natureza altamente dinâmica, os VANTs enfrentam desafios de confiabilidade significativos, o que pode resultar em falhas dramáticas (Landry, 2015).

Além das complexidades envolvidas nos aspectos de voo, é crucial destacar que a turbulência provocada pelas hélices pode representar um desafio na detecção de gases, visto que o movimento do veículo interfere na dispersão desses gases no ambiente (Baptista *et al.*, 2023). Uma alternativa interessante para mitigar esse problema são os nanoquadricópteros. Esses possuem dimensões reduzidas, chegando a medir até 15 cm. Nanoquadricópteros equipados com sensores integrados são promissores devido ao seu pequeno tamanho, ruído baixo e capacidade de entrar em ambientes inacessíveis à robôs terrestres e VANTs convencionais. Devido ao seu *design* com hélices mais compactas, essas aeronaves

apresentam uma interferência mínima na pluma de gases, destacando-se pela sua agilidade e habilidade para voar com segurança sobre áreas com pedestres (Ercolani, Tang e Martinoli, 2022).

Portanto, os principais desafios ao utilizar nanoquadricópteros na medição da qualidade do ar em ambientes fechados incluem: (1) a baixa autonomia, devido à incapacidade dos veículos aéreos não tripulados de pequeno porte não suportarem fontes de energia que permitam voos prolongados, (2) a adequação do sensor no corpo do nanoquadricóptero, (3) a influência das turbulências geradas pelas hélices (Rossi & Brunelli, 2016).

Além disso, é fundamental avaliar cuidadosamente a estabilidade e o planejamento da trajetória para garantir um mapeamento interior eficiente e a cobertura da área de interesse satisfatória. Outro aspecto crucial é a seleção de sensores de resposta rápida e recuperação eficiente para garantir uma localização mais precisa da fonte de odor. A realização de processamento em tempo real em intervalos adequados também é um aspecto essencial para garantir a confiabilidade das medidas coletadas.

Esta tese propõe novas metodologias para o uso de VANTs para localização de vazamentos de compostos orgânicos voláteis (VOC) em ambientes fechados com múltiplas fontes de odor, destacando experimentos bem-sucedidos com nanoquadricópteros para validar a eficiência dessa metodologia. Além de evidenciar a aplicabilidade técnica, a pesquisa destaca implementações práticas em espaços restritos, abrindo perspectivas para automação industrial, vigilância e inovações significativas para a Indústria 4.0.

1.1 Justificativas

Nos últimos anos, o rápido avanço da indústria tem levado a um aumento considerável no número de fábricas de produtos químicos, resultando em uma ampliação dos riscos relacionados aos vazamentos de gases nocivos. Este cenário tem gerado crescentes preocupações sociais e demandas por maior segurança no ambiente de trabalho, além da adoção de regulamentações mais rigorosas sobre a poluição do ar. Como resultado, o interesse na pesquisa e monitoramento da qualidade do ar tem aumentado significativamente (Jing *et al.*, 2021).

A abordagem para detectar a origem da fonte de odores apresenta duas vertentes distintas: a rede de sensores fixos e a robótica móvel (Bayat *et al.*, 2017). A primeira abordagem envolve técnicas em que as unidades sensoriais permanecem estáticas. Em essência, uma rede de sensores fixos consiste na implantação de múltiplos sensores em locais

predefinidos ao longo do ambiente. Esses sensores são encarregados de coletar dados sobre a concentração de gases e, por meio de nós de referência, estimar a localização da fonte do odor.

Por outro lado, na segunda abordagem, a utilização de um sensor de gás montado em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) oferece diversas vantagens em comparação aos sistemas tradicionais que empregam sensores fixos distribuídos pelo ambiente, dependendo do contexto e dos objetivos específicos. Alguns benefícios incluem:

(1) Mobilidade e escaneamento eficiente: Em ambientes amplos e complexos, como armazéns, fábricas ou instalações industriais, um VANT pode rapidamente percorrer todo o espaço, coletando dados de várias áreas, uma capacidade que não é possível com sensores fixos, que estão limitados às suas posições de instalação (Malaver *et al.*, 2015).

(2) Flexibilidade: O VANT pode ser facilmente configurado com diferentes sensores para detectar uma variedade de gases, tornando-o versátil para várias aplicações (Rossi *et al.*, 2014).

(3) Economia de recursos: Sensores de gás em VANTs contribuem para economia de energia e recursos, direcionando com precisão a inspeção para áreas relevantes. Isso evita a coleta contínua de dados em locais desnecessários, otimizando as buscas (Park *et al.*, 2022).

(4) Resposta rápida a emergências: Em cenários de emergência, como vazamentos de gás, a implantação de VANTs permite uma avaliação rápida da situação, identificação da fonte do vazamento e orientação para equipes de manutenção (Fan *et al.*, 2019).

(5) Flexibilidade de implantação: VANTs oferecem a vantagem de escolher a altura e a proximidade dos sensores em relação à fonte de gás, um fator crítico para alcançar precisão em profundidade (Yuan *et al.*, 2020).

(6) Cobertura temporária: Para eventos ou locais que exigem monitoramento temporário, como canteiros de obras, VANTs proporcionam uma solução flexível e temporária, eliminando a necessidade de instalação de sensores fixos e dando mais agilidade para as equipes de campo (Pochwala *et al.*, 2020).

A presente pesquisa se justifica pela necessidade prática de desenvolver novos métodos e tecnologias, visando aprimorar os padrões de segurança no ambiente residencial, comercial e industrial. Essas tecnologias devem permitir operações seguras, cooperativas e redundantes, possibilitando desde a prevenção de vazamentos de gases tóxicos até a otimização do monitoramento ambiental.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa consiste no desenvolvimento de uma plataforma de detecção aérea de gases capaz realizar o mapeamento e a identificação de múltiplas fontes de vazamento de gases voláteis em ambientes internos de alto risco ou de difícil acesso para as pessoas.

1.2.1 Objetivos específicos

- (1) Realizar análise e avaliação dos *hardwares* a serem empregados no projeto.
- (2) Efetuar a integração do sensor de gás na aeronave.
- (3) Desenvolver *drive* de comunicação entre o sensor e o *firmware* do nanoquadricóptero.
- (4) Elaborar algoritmo computacional para orientar a aeronave na tarefa de se deslocar pelo ambiente e na aquisição dos dados do sensor de gás.
- (5) Conduzir testes com o intuito de caracterizar a resposta do sensor de gás.
- (6) Planejar testes experimentais em diferentes cenários e avaliar os resultados obtidos.
- (7) Analisar os dados derivados das leituras do sensor de gás para deduzir a localização da fonte de odor.
- (8) Examinar a validade estatística do método de detecção proposto.

1.3 Estrutura da Tese

Essa Tese está dividida da seguinte forma:

- **Capítulo 2** – Revisão da literatura. Neste capítulo é realizada uma revisão sobre o sensoriamento de gases voláteis, com especial atenção para a utilização de VANTs nesse contexto.
- **Capítulo 3** – Materiais. Descreve os materiais utilizados para a execução dos ensaios.
- **Capítulo 4** – Métodos. Esse capítulo detalha os métodos utilizados durante o planejamento e a execução dos ensaios, fornecendo uma base sólida para a compreensão da metodologia adotada.
- **Capítulo 5** – Resultados e Discussão. Apresentação dos resultados obtidos, análise dos dados e interpretação dos resultados. Esse capítulo está organizado em cenários distintos, proporcionando uma visão organizada das descobertas alcançadas, além de contribuir para uma compreensão mais completa das observações realizadas.
- **Capítulo 6** – Conclusões. Este capítulo apresenta as conclusões derivadas da pesquisa, bem como recomendações para futuros trabalhos.

- **Referências Bibliográficas** - Ao final do trabalho, são fornecidas as referências bibliográficas citadas ao longo dessa pesquisa, consolidando a base teórica e científica que sustenta o desenvolvimento da Tese.

1.4 Publicação da autora relacionada à Tese

Oliveira, A. M., Morais, A. S., Lima, G. V., Souza, R. M. J. A., & Oliveira-Lopes, L. C. (2023). Detection of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Indoor Environments Using Nano Quadcopter. *Drones*, 7(11). <https://doi.org/10.3390/drones7110660>

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo de revisão da literatura proporciona uma análise abrangente das pesquisas mais recentes no contexto da detecção de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC). Ao longo deste capítulo, serão explorados quatro principais tópicos: a importância dos VOC, a evolução dos métodos para a detecção de VOC, o uso de robôs móveis terrestres para sensoriamento de gás, o uso dos VANTs no sensoriamento de gás e sua evolução ao longo do tempo, além das lacunas e oportunidades de contribuição neste campo de pesquisa.

2.1 Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) e sua importância

Os VOC têm sido objeto de intensa pesquisa nas últimas décadas, devido à sua relevância para a química atmosférica, impactos ambientais e saúde humana (Suman *et al.*, 2021), (Collier-Oxandale *et al.*, 2019). Esses compostos são de interesse em diversos campos, como análise de alimentos, fragrâncias, pesquisa ambiental e atmosférica, aplicações industriais, segurança, ciências médicas e biológicas (Epping & Koch, 2023).

Os VOC são substâncias químicas que evaporam facilmente em temperatura ambiente, apresentando alta pressão de vapor e, conseqüentemente, rápida dispersão na atmosfera (Suman *et al.*, 2021), (Lin *et al.*, 2019). Esses compostos possuem alta volatilidade, mobilidade e resistência à degradação, permitindo assim seu movimento através de grandes distâncias (Pandey & Yadav, 2018). A liberação de VOC pode derivar de uma vasta gama de fontes tanto internas quanto externas. Entre as fontes externas estão incluídas indústrias químicas, produção de papel, processamento de alimentos, secagem de tintas, transporte, refinarias de petróleo, fabricação de automóveis, desengraxantes de metais, fabricação têxtil, fábricas de componentes eletrônicos, solventes e produtos de limpeza. Por outro lado, as fontes internas compreendem produtos domésticos, materiais de escritório, impressoras, sistemas de troca de calor, materiais isolantes, madeira prensada, fogões a lenha e vazamentos de tubulações (Kamal *et al.*, 2016).

Além de influenciarem diretamente a qualidade do ar, os VOC desempenham papel fundamental na química atmosférica. Participam de reações fotoquímicas que afetam a formação de oxidantes atmosféricos, impactando a produção de ozônio e outros compostos (Huang *et al.*, 2020).

A exposição crônica a VOC pode ter efeitos adversos na saúde humana, associados a problemas respiratórios, cardiovasculares e neurológicos (Maung *et al.*, 2022). A complexidade é acentuada pela natureza incolor e inodora de muitos desses gases, tornando-os praticamente indetectáveis. Tentativas de substituição por alternativas não tóxicas são limitadas, pois parte significativa desses gases permanece tóxica, representando riscos de asfixia, explosões ou incêndios. A concentração desses poluentes atmosféricos pode ser mais elevada no ar interno, justificando o foco regulatório nesse ambiente (Epping & Koch, 2023).

Acidentes podem ser evitados por meio da utilização de sistemas de monitoramento e alerta que capacitam os humanos a avaliarem os riscos iminentes, especialmente em locais onde os riscos de vazamento não podem ser detectados pelos humanos de forma rápida e decisiva (Al-Okby *et al.*, 2024). Além disso, a análise dos VOC desempenha papel importante na promoção da sustentabilidade e melhoria da qualidade de vida, permitindo monitorar a qualidade do ar, identificar fontes de poluição e apoiar iniciativas de redução da exposição ambiental (Cova *et al.*, 2022).

No passado, a identificação de VOC era principalmente realizada por meio da coleta de amostras e análises externas utilizando a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa (Lindinger *et al.*, 2005). Embora essas técnicas analíticas sejam precisas, elas são dispendiosas, demoradas e não oferecem mobilidade. Diminuir os custos e aumentar a portabilidade das tecnologias de monitoramento são elementos essenciais para alcançar o objetivo de avaliar os VOCs-alvo por meio do monitoramento em tempo real, com uma resolução espacial significativa (Yurko *et al.*, 2019). Para alcançar esse objetivo, diversos pesquisadores têm se empenhado no desenvolvimento de sensores de gás compactos, eficientes, acessíveis e de rápida resposta para a detecção e quantificação de VOC (Lin *et al.*, 2019).

Diversos tipos de sensores de gás estão disponíveis para a medição de compostos voláteis, sendo empregados predominantemente na avaliação do conteúdo total de VOC devido à sua natureza não seletiva. Entre os sensores amplamente utilizados estão os detectores de fotoionização (*PhotoIonization Detector* - PID), sensores eletroquímicos e sensores de óxido de metal (Epping & Koch, 2023).

Apesar dos progressos já realizados, persiste a necessidade de aprimorar métodos eficazes para identificar, monitorar e mitigar os Compostos Orgânicos Voláteis, sublinhando a constante relevância dessa área para a preservação ambiental, segurança e a saúde humana (Kalavathi Devi *et al.*, 2023).

2.2 A evolução dos métodos para a detecção de VOC

Em 2005, Yamazoe (2005) constatou que a detecção dos níveis de benzeno no ar ambiente, inferiores a 100 ppb (parte por bilhão), estavam significativamente muito abaixo das capacidades dos sensibilidade dos sensores de gás comercialmente disponíveis. Em aproximadamente uma década, avanços tecnológicos possibilitaram um aprimoramento na sensibilidade desses sensores, permitindo que alguns sistemas alcancem níveis de sensibilidade bem melhores, na faixa de ppb, e, em alguns casos, até mesmo sub-ppb, para a monitorização do benzeno no ar ambiente.

A evolução da tecnologia de sensores de gás possibilitou a disponibilidade no mercado de uma variedade de sensores de baixo custo dedicados à monitorização da poluição atmosférica. Entre esses dispositivos encontram-se sensores de óxido de metal, células eletroquímicas amperométricas ou potenciométricas, detectores de foto-ionização, cromatógrafos gasosos portáteis e microcromatógrafos (Spinelle *et al.*, 2017).

No âmbito da detecção química, os sensores MOX destacam-se pela sua ampla aplicação, atribuída ao baixo custo, capacidade de miniaturização, baixo consumo de energia, longa vida útil, facilidade de uso e capacidade de detectar uma ampla gama de gases e vapores químicos. Além disso, eles são caracterizados pela facilidade de ajuste de sua saída, que geralmente ocorre na forma de uma mudança na impedância elétrica do material sensor (Al-Okby *et al.*, 2022). O tempo de resposta de um sensor de gás semicondutor de óxido de metal quando exposto ao gás é tipicamente inferior a alguns segundos, embora geralmente leve mais de 30 s para a resposta se recuperar após a remoção do gás (Sato *et al.*, 2020).

O estudo de Palacín *et al.* (2022) introduz um novo “nariz eletrônico”, compacto, acessível e com baixo consumo de energia. Consiste em um conjunto de 16 unidades de um sensor de gás MOX de silício integrados em um dispositivo sensor comercial BME680. Enquanto a sensibilidade volátil e a sensibilidade cruzada são desafios comuns em sensores de gás MOX, esse estudo oferece uma abordagem interessante para superá-los. Ao combinar a variabilidade inerente dos sensores de gás MOX de tipo único com técnicas avançadas de processamento de sinal, foi possível criar um instrumento otimizado para a classificação de dois compostos voláteis específicos: etanol e acetona. O nariz eletrônico proposto avalia a resistência da camada de detecção dos 16 sensores de gás MOX integrados. Os resultados da validação demonstraram uma classificação bem-sucedida dos dois compostos voláteis em condições de laboratório.

Visando melhorar o desempenho dos sistemas compostos por sensores tipo MOX, Martinez *et al.* (2019) propõem uma nova abordagem para superar a limitação do tempo de

resposta lento desses sensores ao medir concentrações de gases em plumas turbulentas. Eles introduzem um modelo dinâmico não linear de primeira ordem e demonstram que a resposta lenta pode ser compensada efetivamente. A pesquisa destaca a eficiência do modelo, sugerindo sua aplicabilidade em ambientes turbulentos, especialmente em cenários com robôs olfativos ou plataformas de sensores móveis.

Outra desvantagem comum de qualquer sensor de gás MOX é sua sensibilidade volátil e sensibilidade cruzada diferentes. Essas diferenças podem se tornar um grande problema para uma aplicação que utiliza apenas um sensor de gás MOX. Com o propósito de aprofundar a análise do comportamento de distintos sensores MOX comerciais, o estudo conduzido por Neubert *et al.* (2021) introduz um conjunto de sensores de gás flexível concebido para integração na Internet das Coisas (IoT), particularmente em cenários vinculados às ciências biológicas. Equipado com dois sensores de gás, o dispositivo foi aprimorado para medir continuamente Compostos Orgânicos Voláteis Totais (TVOC). Os experimentos laboratoriais investigaram o desempenho dos sensores em diferentes condições. A integração prática do nó sensor em ambientes laboratoriais com robôs móveis e estacionários foi demonstrada. Os resultados mostram a eficácia na detecção precoce de vapores de solventes, com a adaptabilidade do sistema para rápida integração de novos sensores. A dependência da resposta do sensor em relação aos compostos, distância da fonte e velocidade dos sistemas de automação foi destacada. Os autores sugerem a fusão de sensores e o uso de inteligência artificial para otimizar a interpretação dos resultados, destacando o potencial do aprendizado de máquina na distinção de diferentes VOC para identificar riscos precisos para operadores humanos.

Em continuidade à mesma linha de pesquisa, o estudo conduzido por Al-Okby *et al.* (2022) explora a aplicação do sensor de gás comercial MOX, modelo SGP41 (Sensirion AG, Stafa, Suíça), em um nó de sensor ambiental IoT. O foco da pesquisa é a detecção e alerta de gases perigosos. Inúmeros ensaios foram executados com o propósito de avaliar a capacidade de detecção de vazamentos de óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis em variadas concentrações, volumes e distâncias. Esta análise contemplou a investigação dos impactos desses parâmetros na velocidade de resposta e no tempo de recuperação dos sensores. Comparativamente, os diferentes sensores integrados ao nó sensor foram examinados, proporcionando uma compreensão abrangente do sistema. Os autores conduziram uma investigação sobre o desempenho desse conjunto de sensores de gás na detecção de 12 compostos diferentes em dois ambientes distintos: o primeiro, uma capela de preparação química; o segundo, um laboratório automatizado e de acesso aberto. O trabalho

teve como objetivo principal avaliar o desempenho do sensor comercial SGP41 para sua adequação na integração a nós sensores e dispositivos de monitoramento de qualidade do ar em ambientes suscetíveis a vazamentos de substâncias nocivas. Os experimentos realizados tiveram como objetivo principal fornecer parâmetros cruciais para a eventual implementação de um sistema autônomo de detecção e alarme de gases em laboratórios químicos, visando projetos futuros.

Utilizando uma abordagem diferenciada, o estudo de Papale *et al.* (2023) apresentou um sistema de monitoramento baseado em aprendizado de máquina utilizando um sensor MOX, modelo BME680 da empresa Bosch (Gerlingen, Alemanha), vestível para detecção de VOC integrado em uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF). A RSSF, composta por nós com âncoras fixas, utiliza algoritmos de aprendizado de máquina para localizar dispositivos móveis e mapear a distribuição de etanol em ambientes internos. O sensor vestível detecta VOC correlacionando os sinais com a concentração real de etanol medida por um Detector de Fotoionização (*PhotoIonization Detector* - PID) fixo. A RSSF, composta por cinco nós de detecção móveis, três nós âncora e um nó central, implementa tecnologia integrada de sensor de gás, comunicação BLE e algoritmos de aprendizado de máquina, visando monitorar compostos orgânicos voláteis em ambientes internos.

2.3 O uso de robôs móveis terrestres para sensoriamento de gás

Diante dos desafios complexos do sensoriamento de gases, a utilização de robôs móveis terrestres (UGVs - Unmanned Ground Vehicles) se apresenta como uma opção, com destaque para os pequenos robôs envolvidos na localização e mapeamento de fontes de gás. Esses robôs são frequentemente empregados em experimentos internos de pequena escala para testar algoritmos de forma rápida.

A habilidade intrínseca das plataformas UGVs em acomodar uma ampla gama de sensores, como LIDAR (*Laser imaging, detection, and ranging*) anemômetros ultrassônicos e narizes eletrônicos equipados com matrizes de sensores químicos, aliada à sua mobilidade, evidencia sua versatilidade em comparação aos sensores estáticos (Francis *et al.*, 2022). A pesquisa conduzida por Monroy *et al.* (2018) aborda de maneira original a localização de fontes de emissão de gás em ambientes do mundo real, empregando um robô móvel e integrando diversas modalidades de sensores, como visão e detecção química. São exploradas as relações semânticas entre gases e objetos reconhecidos visualmente, permitindo uma busca mais eficiente por fontes de gás. Os resultados, obtidos em experimentos simulados e reais, demonstram a eficácia da abordagem. Os autores destacam alguns desafios relevantes. Um

deles é a dependência do sistema de reconhecimento de objetos. Esse cenário é desafiador pois apenas objetos corretamente detectados e categorizados podem ser considerados como candidatos a fontes de gás.

Empregando também um robô móvel, Sánchez-Sosa *et al.* (2018) propõem a aplicação do Modelo de Pluma Gaussiana na localização de uma fonte de gás em ambientes internos. Em uma abordagem que não requer informações sobre a velocidade do vento, a pesquisa valida o modelo em uma sala desocupada, identificando uma fonte de um vazamento de gás exclusivamente por meio de dados de concentração. Utilizando uma fonte artificial de gás gerada por um ventilador e etanol líquido, os resultados indicam que o modelo é apto para localizar a fonte experimental. As conclusões destacam a capacidade do modelo em descrever parcialmente o padrão experimental da pluma, mesmo em ambientes com distribuição de vento quase uniforme e quase unidirecional. A implementação do modelo possibilitou a estimativa da posição da fonte utilizando apenas sensores de gás, apresentando tempos de localização comparáveis a estudos que empregam sistemas anemométricos dispendiosos em conjunto com sensores de gás.

Utilizando um dispositivo móvel equipado com um conjunto de sensores de gás de baixo custo, Palacín *et al.* (2019) propuseram e validaram um sistema inovador destinado à detecção precoce de vazamentos de gás em ambientes internos. Designado pelos autores como Robô Assistente Pessoal (RAP), este sistema é equipado com um conjunto de 16 sensores MOX para gás, operando de forma contínua. Experimentos preliminares forneceram dados para treinar um classificador de análise discriminante parcial por mínimos quadrados, tendo ar, etanol e acetona como classes de saída. Posteriormente, as capacidades de detecção de vazamentos de gás do robô móvel foram experimentalmente avaliadas em uma instalação pública, expondo o sistema a vapores de etanol, acetona e uma mistura de etanol e acetona em diferentes locais. Os resultados positivos obtidos em diversas condições operacionais ao longo dos experimentos confirmaram as capacidades de detecção precoce do sistema proposto. Por exemplo, o RAP foi capaz de detectar um vazamento de gás dentro de uma sala fechada a partir do corredor externo, devido a apenas pequenos vazamentos sob a porta induzidos pelo sistema de ventilação forçada do edifício.

Empregando uma abordagem multirrobôs, o estudo conduzido por Feng *et al.* (2020) apresenta um método inovador de localização de fontes, denominado Otimização aprimorada do enxame de partículas (Improved Particle Swarm Optimization - IPSO), que dispensa informações sobre o fluxo de ar em ambientes internos dinâmicos. A pesquisa integra experimentos práticos com robôs e simulações numéricas para validar a eficácia do método.

Inicialmente, três robôs móveis foram empregados em experimentos para localizar uma fonte de etanol em um ambiente interno dinâmico com um ventilador oscilante. Posteriormente, o ambiente experimental foi reproduzido numericamente por meio de dinâmica de fluidos computacional, e os resultados numéricos corroboraram com os experimentos robóticos, evidenciando a robustez das simulações numéricas. As conclusões enfatizam que o método IPSO se mostra eficaz na localização de fontes em ambientes internos dinâmicos, exibindo robustez e superando métodos comparativos, especialmente em cenários de ventilação mecânica e natural.

Outra abordagem que utiliza múltiplos robôs, explorada por Tran *et al.* (2023), propõe uma nova estratégia para o controle de enxames voltado à localização e mapeamento de fontes de gás. A metodologia incorpora um mecanismo de sensoriamento ativo destinado a orientar o enxame em direção a locais otimizados para medição, além da aplicação de uma fusão de informações sequenciais de Monte Carlo para a estimativa de regiões com elevada concentração de gás. Os resultados experimentais destacam a superioridade dessa estratégia em relação aos métodos preexistentes em termos de precisão, tempo de convergência e precisão cartográfica. Contudo, os autores identificaram algumas lacunas, enfatizando a necessidade de uma calibração criteriosa de parâmetros, considerando a sobrecarga na infraestrutura de comunicação e a influência do número de robôs na precisão do sistema. Adicionalmente, são salientados desafios práticos, como a limitação da autonomia da bateria e a urgência no desenvolvimento de algoritmos mais eficientes para a estimativa de posição.

Conforme evidenciado, embora os UGVs tenham demonstrado êxito em diversas aplicações e apresentem vantagens, como maior autonomia de bateria, capacidade de realizar computação on-line de algoritmos complexos, lenta velocidade de movimento e sua capacidade de parar para fazer medições; apresentam desafios significativos decorrentes de sua limitação intrínseca de operação exclusivamente em duas dimensões (2D). Mesmo com a implementação de múltiplos sensores e variações de altura, os UGVs revelam-se ineficazes para localizar fontes em elevações superiores ou detecção de gases mais leves que o ar em distâncias consideráveis de sua origem, devido à capacidade restrita de detecção de uma porção limitada da pluma a partir do solo. Em termos gerais, os UGVs demonstram maior adequação para aplicações que demandam uma cobertura mais densa de medições de concentração de gases, coletadas ao longo de extensos períodos temporais e para gases que se acumulam nas camadas inferiores do ambiente (Francis *et al.*, 2022).

2.4 O uso dos VANTs para sensoriamento de gás e sua evolução

A aplicação de VANTs para detecção de gases representa uma tendência recente na área e apresenta uma série de desafios inéditos. Os setores industriais e militares, por exemplo, estão experimentando uma evolução significativa ao incorporar a tecnologia de drones em suas operações. Este avanço não só aprimora a eficiência, mas também traz benefícios e os torna mais competitivos. Diversos fabricantes de drones responderam a essa demanda, desenvolvendo modelos equipados com diversos acessórios, como sensores, câmeras, localizadores, atendendo assim às necessidades específicas desses setores. Os VANTs equipados com detectores de gás, por exemplo, oferecem uma solução inovadora para a redução de custos e riscos associados às inspeções manuais, que anteriormente dependiam apenas de detectores convencionais fixos e portáteis (Emran *et al.*, 2017).

O uso de VANTs em diversas tarefas também tem impacto significativo no setor de gestão ambiental. Agências ambientais e departamentos de polícia em diversos países estão adotando drones como ferramentas essenciais para a vigilância da conformidade com regulamentações de emissões atmosféricas, ampliando assim a eficácia das operações de fiscalização (Burgués & Marco, 2020).

Com destaque na utilização de VANTs para o monitoramento eficaz de gases ambientais, o trabalho de Kersnovsk *et al.* (2017) apresenta um quadricóptero equipado com câmera e sensor de dióxido de carbono. O sistema realiza a detecção autônoma de gases enquanto identifica visualmente alvos predefinidos. Os testes mostram a capacidade do VANT em analisar a qualidade do ar e mapear tridimensionalmente a localização dos alvos em tempo real. Apesar da eficácia, o estudo aponta limitações, especialmente relacionadas à dependência da taxa de transmissão de quadros no algoritmo de processamento de imagem para a detecção de alvos, o que pode afetar a velocidade do *software*. A pesquisa sugere que o sistema desenvolvido é uma solução efetiva para várias aplicações, incluindo detecção de vazamentos de gases e incêndios, mas reconhece a necessidade de superar desafios técnicos para otimizar o desempenho do algoritmo de processamento de imagem.

Voltado para a detecção química em ambientes urbanos e suburbanos, o trabalho de X. He *et al.* (2019) aborda o desenvolvimento de um sistema robótico aéreo autônomo equipado com um sensor químico de alto desempenho. O robô realiza a identificação e quantificação de agentes químicos, possibilitando aplicações como mapeamento químico, localização de fontes e estimativas. Para enfrentar desafios em ambientes urbanos, onde obstáculos como edifícios e árvores são prevalentes, é empregado um algoritmo de campo potencial que considera ações passadas. O estudo também destaca uma estação terrestre personalizada para controle do robô,

planejamento e visualização de dados em tempo real. Um método empírico é utilizado para maximizar o tempo de voo do robô, ampliando sua eficácia operacional e garantindo uma distância segura de operação. Experimentos de dispersão química ao ar livre evidenciam a eficácia do sistema na detecção e mapeamento preciso de vazamentos de gás propano.

Empregando VANTs na detecção de substâncias químicas perigosas em áreas amplas, a pesquisa conduzida por Takei *et al.* (2019) descreve experimentos voltados para a localização tridimensional de fontes gasosas, mediante a utilização de um quadricóptero equipado com um conjunto de sensores de gás semicondutores. O foco está no desenvolvimento de um drone 3D com sensores montados diretamente sob cada rotor, permitindo a detecção de produtos químicos perigosos em áreas extensas. Os resultados mostram que a saída combinada dos sensores fornece informações cruciais para estimar o gradiente de concentração de gás e a direção da fonte de gás. O estudo destaca a aplicação de filtragem não causal para alcançar zero defasagem nos resultados dos sensores. Os resultados mostram a capacidade do drone em estimar a direção da fonte de gás, mas destacam desafios, como assimetria na resposta dos sensores devido à não estacionalidade da pluma de gás. A aplicação de filtragem não causal para atingir zero defasagem é mencionada, mas a análise não explora completamente os possíveis efeitos colaterais dessa abordagem.

Estudos mais recentes englobam aplicações bem-sucedidas com o uso de nanoquadricópteros em ambientes internos para medição de qualidade do ar. Em um estudo conduzido por Neumann *et al.* (2019a), a utilização de um enxame de nanoquadricópteros foi empregada para monitorar a qualidade do ar em ambientes industriais, fundamentando-se na premissa de que os agentes transportados pelo ar podem constituir uma ameaça à saúde dos trabalhadores. O conceito adotado inclui a integração de um enxame composto por nanoquadricóptero, utilizando o *Crazyflie 2.0* como plataforma base, associado a pequenos sensores leves de gás de óxido de metal. Segundo os autores, essa configuração possui a capacidade de medir o Composto Orgânico Volátil Total (TVOC) em partes por bilhão (ppb) e estimar a concentração equivalente de dióxido de carbono (eCO₂) em partes por milhão (ppm). Contudo, é relevante notar que o referido carece da apresentação de dados demonstrativos provenientes dos diversos sensores utilizados, além de uma análise sobre a precisão das detecções.

Fazendo uso de nanoveículos aéreos, o estudo descrito por Burgués *et al.* (2019) apresenta métodos inovadores para o mapeamento de fontes de gás em ambientes internos. Duas estratégias distintas foram propostas, ambas baseadas na extração de características do sinal: a medição instantânea e a detecção de frequência. Embora a estratégia inicial de

rastreamento de plumas, fundamentada no gradiente de gás e na frequência de ataque, tenha demonstrado eficiência insatisfatória, os autores sugeriram um algoritmo de mapeamento pós-ensaio desenvolvido a partir das informações coletadas pelo robô. Essa abordagem tem o potencial de proporcionar um mapeamento mais preciso e refinado das fontes de gás. No entanto, vale ressaltar que esse processo precisou de ajustes iniciais e envolveu um processamento de dados complexo, demandando recursos computacionais substanciais e experiência em análise de dados para obter resultados significativos.

Um nanoquadricóptero equipado com um dispositivo de amostragem de microagulha foi empregado no estudo descrito por Cheng e Yuan (2022) para coletar VOCs em ambientes industriais. O sistema de detecção de gás utilizou uma agulha de aço inoxidável de 7 cm preenchida com adsorventes de vinilbenzeno em pó para essa finalidade. Um eixo telescópico integrado ao drone contribuiu para superar a turbulência do ar durante o processo de coleta. O peso total do dispositivo de amostragem foi inferior a 200 g. Este sistema permitiu a captura de VOCs provenientes de instalações siderúrgicas e de semicondutores pelo nanossensor acoplado ao drone, com identificação subsequente dos compostos por meio de cromatografia gasosa e espectrometria de massa. Essa metodologia se mostrou eficaz na identificação de fontes estacionárias de poluição.

Combinado inovação em algoritmo e experimento reais, o estudo desenvolvido por Ercolani, Tang e Martinoli (2022), propôs a metodologia GaSLAM (*Simultaneous Gas Localization and Mapping*). Essa metodologia integra de maneira orgânica os métodos GDM (*Gas Distribution Mapping*) e GSL (*Gas Source Localization*) de última geração. A abordagem proposta apresenta benefícios significativos, onde o modelo de pluma subjacente do método GSL atua como indicador das zonas gasosas em todo o mapa, enquanto o método GDM proporciona uma estimativa média do gás nas áreas exploradas, validando assim a presença do gás. O GaSLAM utiliza as informações sinérgicas dos algoritmos para maximizar o conhecimento do ambiente, implementando uma estratégia de navegação adaptativa baseada em quantidades informativas. Os autores sugerem que a estrutura geral desse método, combinando STE e 3D KernelDM, os algoritmos +V/W e a navegação adaptativa, pode servir como base para o desenvolvimento de outros métodos visando o mapeamento simultâneo da distribuição de gás e a localização da fonte. A implementação do GaSLAM é testada em um simulador de alta fidelidade e em experimentos reais em diversas condições ambientais, utilizando o nanoquadricóptero *Crazyflie 2.1* aprimorado com uma placa de circuito impresso personalizada e um sensor CO/VOC MICS-5521 da SGX *Sensortech Technologies*. A localização é melhorada por meio de um sistema de captura de movimento da *Motion*

Analysis, proporcionando resultados promissores para a detecção e mapeamento de gases em ambientes tridimensionais.

O estudo de Bouras *et al.* (2023) investigou os efeitos dos rotores de drones nos sinais dos sensores, conhecidos como *downwash*. Experimentos avaliaram a resposta do sensor de gás em diferentes alturas acima e abaixo do drone, com rotores ligados e desligados. Outros experimentos testaram o sistema de monitoramento na geração de mapas de distribuição de gás e localização de fontes, destacando que uma boa cobertura da área de interesse e velocidade moderada do drone melhoram a precisão do mapa de concentração de gás e estimativa da localização da fonte. A implementação de um sensor MOX em nanoquadricópteros autônomos para GSL foi eficaz, validada em ambientes internos para detecção e mapeamento de gás. Os autores, no entanto, apontam algumas limitações, incluindo a necessidade de contornar obstáculos e aprimorar a cobertura da área de interesse. Eles propõem a implementação de sensores adicionais para redundância e sugerem a replicação da pesquisa em ambientes mais complexos com múltiplas fontes de gás.

Com a preocupação sobre os potenciais impactos dos movimentos das hélices nas leituras dos sensores de gás, Shigaki *et al.* (2022) realizou uma pesquisa dedicada à disposição estratégica de sensores químicos em um nanoquadricóptero. Além disso, propuseram um algoritmo de fundição de surto 3D para avaliar o desempenho do nanoquadricóptero no rastreamento de plumas químicas 3D, utilizando tanto simulações quanto experimentos reais. Este estudo contribui para aprimorar a eficiência do rastreamento químico em ambientes desafiadores, destacando a importância da colocação estratégica de sensores e de um algoritmo adequado.

2.5 Lacunas e oportunidades de contribuição

Com base na revisão da literatura, foram identificadas diversas lacunas significativas na pesquisa. Em primeiro lugar, foi constatado que a maioria dos estudos anteriores que utilizaram o rastreamento de plumas com base no gradiente de gás não apresentaram resultados eficazes. Além disso, as pesquisas encontradas na literatura demandam ajustes iniciais e processamento de dados complexo, o que requer recursos computacionais substanciais e um elevado nível de especialização em análise de dados para torná-los relevantes na prática. A maioria desses estudos não oferece a capacidade de avaliar rapidamente e com precisão a localização das fontes de odor e não extrapolam a análise para múltiplas fontes de odor, o que também representa uma lacuna significativa na área.

Ademais, há escassez de estudos que forneçam dados reais de leituras de gases provenientes de experimentos realizados com drones e sensores disponíveis comercialmente. Uma área promissora que merece exploração mais profunda é a viabilidade do uso de nanoquadricópteros para detecção de vazamentos de gases VOC, assegurando que o movimento das hélices não inviabilize a coleta de dados pelo sensor de gás a bordo.

Para atender às crescentes demandas relacionadas a esse tema, torna-se imprescindível investigar as condições ideais nas quais a combinação de fatores relacionados à fonte de odor, sensibilidade do sensor de gás e movimentos da hélice do veículo são propícias para a geração de informações úteis. Essas informações podem, posteriormente, ser aplicadas com sucesso em algoritmos de Mapeamento de Distribuição de Gás (GDM) e Localização de Fonte de Gás (GSL).

Nessa tese foram realizados estudos direcionados e uma série abrangente de experimentos, que incluíram monitoramento em tempo real e a abordagem de desafios relacionados à seleção de rotas. A configuração específica da aeronave, a seleção cuidadosa do sensor e a estratégia de disseminação de gases no ambiente mostram-se como elementos fundamentais para alcançar e fortalecer os resultados obtidos.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS

Neste capítulo, é oferecida uma análise dos elementos essenciais para a concepção e implementação do sistema proposto. Inicialmente, são discutidos o projeto do nanoquadricóptero, suas características estruturais e funcionais, bem como os requisitos específicos para sua integração ao sistema. Em seguida, é explorado o sistema de posicionamento, destacando as tecnologias e metodologias empregadas para garantir uma localização precisa e confiável durante as operações. Além disso, são fornecidas informações detalhadas sobre o sensor de detecção de VOC, incluindo sua especificação técnica e princípios de funcionamento. Na sequência, é examinada a interface de comunicação, que desempenha um papel fundamental na coordenação e troca de dados entre os componentes do sistema. Também são apresentadas as características e a construção do dispositivo construído para emular uma fonte de vazamento de gases.

3.1 *Design do Nanoquadricóptero*

O *Crazyflie 2.1* (CF2), apresentado na Figura 3.1, é uma plataforma de desenvolvimento de voo de código aberto altamente versátil, caracterizada por seu peso ultraleve de apenas 27g e distância entre os eixos dos motores diagonalmente opostos de 92 mm (BITCRAZE, 2023).

Figura 3.1 Nanoquadricóptero *Crazyflie 2.1*.



Fonte: Extraído de Bitcraze (2023).

Fabricado pela empresa *Bitcraze AB* (*Malmö*, Suécia), esse dispositivo foi escolhido como a peça central dessa tese devido a uma série de vantagens distintas. Estas incluem suporte contínuo por parte do fabricante, o que garante atualizações e melhorias constantes, bem como o fato de código ser aberto, hospedado no *Github*, que nos proporciona total controle sobre o *firmware* operando no nanoquadricóptero, sobre o *firmware* do rádio e, também, sobre a biblioteca do cliente na estação base.

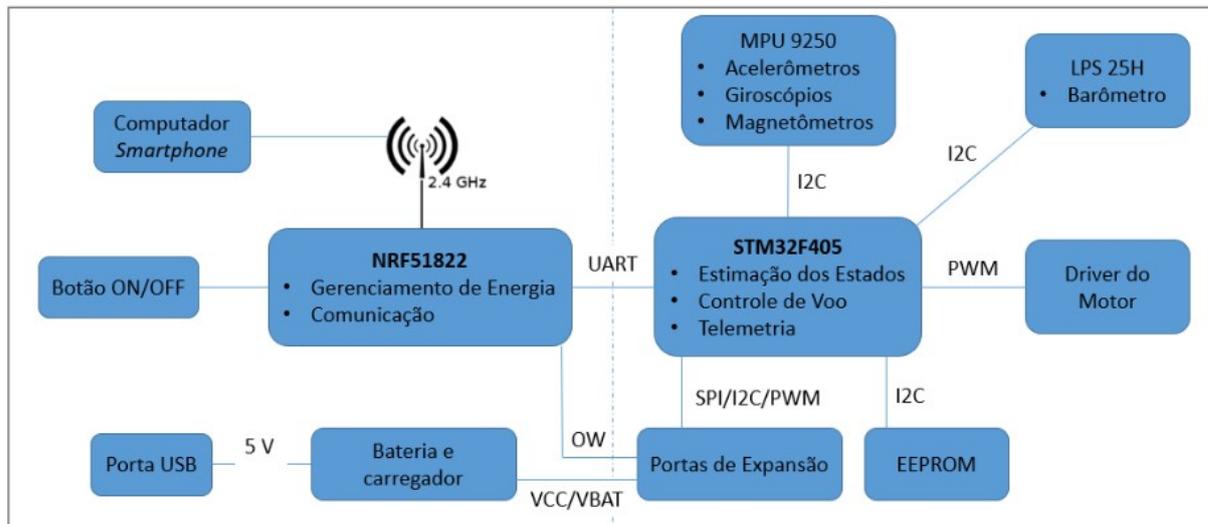
Apesar das dimensões compactas e carga útil limitada, o CF2 oferece uma boa capacidade de carga, com um *payload* de 15 g, suficiente para acomodar simultaneamente a placa do sistema de posicionamento e o sensor de gás (BITCRAZE, 2023). Além disso, o CF2 é relativamente rápido e seguro para testes internos (Michalski *et al.*, 2023).

As hélices, fabricadas em material plástico, possuem um diâmetro de 45 mm. É interessante notar que, devido à rotação oposta dos motores do veículo, há dois modelos de hélices que devem ser adequadamente posicionados nos motores que giram no sentido horário e anti-horário (BITCRAZE, 2023).

Quanto aos conjuntos de atuadores, cada um é constituído por um motor acoplado a uma hélice; o CF2 opta por motores de corrente contínua (CC), atingindo uma velocidade de rotação máxima de 25.000 rpm.

O CF2 possui tecnologia avançada, incorporando dois microcontroladores distintos. O primeiro é o modelo ARM *Cortex-M4* (STM32F405) com 192 kB de RAM, 1 Mb de memória flash e uma velocidade de *clock* de 138 MHz. Esse microcontrolador desempenha um papel fundamental na interação com os sensores, motores e memória EEPROM, além de executar a aplicação principal. Por outro lado, o segundo microcontrolador, um ARM *Cortex-M0* (nRF51822), equipado com 16 kB de RAM, 128 kB de memória flash e uma velocidade de *clock* de 32 MHz, assume as responsabilidades de gerenciamento de energia e comunicação de rádio (BITCRAZE, 2023). Uma representação ampla da estrutura do sistema pode ser observada na Figura 3.2.

Figura 3.2 Arquitetura do Crazyflie 2.1.



Fonte: Extraído de Lima (2019).

A fonte de energia utilizada pelo CF2 é uma bateria de polímero de lítio de célula única. Com uma capacidade de 2500mAh, fornece uma tensão de 3,7V e possui excelente relação potência/peso, proporcionando aproximadamente 7 minutos de voo contínuo. Além disso, a bateria vem equipada com um Módulo de Circuito de Proteção integrado, que impede que o usuário sobrecarregue ou descarregue excessivamente a bateria, ou a exponha a curtos-circuitos. Sendo facilmente removível do CF2, foram disponibilizados pelo fabricante conectores que possibilitam o carregamento em paralelo, reduzindo o intervalo entre os experimentos.

O CF2 é equipado com uma unidade de medição inercial (IMU) do modelo MPU-9250. Essa IMU inclui um acelerômetro, um magnetômetro e um giroscópio (cada um com sensibilidade nos três eixos), além de um barômetro (modelo LPS25H) que auxilia na estimativa da altitude, totalizando em 10 graus de liberdade (DoF). Na configuração experimental descrita nesta Tese, a obtenção de medições de orientação depende exclusivamente da IMU, tanto para os controladores integrados quanto externos. A IMU alimenta o sistema de estimativa baseado em um Filtro de Kalman Estendido (EKF), com as variáveis auferidas em relação ao sistema de coordenadas fixo ao corpo (Souza, 2022).

A comunicação entre os veículos e o computador desktop é estabelecida por meio de uma interface de rádio. O CF2 é equipado com um amplificador de rádio de 20 dBm, cujo desempenho foi testado para alcançar distâncias de até 1 km com perda de sinal tolerável. Para a conexão ao computador desktop, o CF2 utiliza uma conexão USB com um *dongle* de rádio, ilustrado na Figura 3.3 (BITCRAZE, 2023).

Figura 3.3 Crazyradio



Fonte: Extraído de Lima (2019)

O *dongle* fornecido pela *Bitcraze* baseia-se no semicondutor SoC nRF24LU1+ e opera na frequência de 2,4 GHz. A taxa de transmissão de dados entre os dispositivos pode ser selecionada entre 250 Kbps, 1 Mbps ou 2 Mbps, oferecendo flexibilidade para atender a diversas necessidades. O alcance desse sistema foi testado e confirmado pelo fabricante, alcançando até 80 m ao operar a 250 Kbps (BITCRAZE, 2023).

O CF2 é distribuído com API (*Application Programming Interface*) *Python* de alto nível, que permite a prototipagem rápida de código sem profundo conhecimento de hardware (Michalski *et al.*, 2023). O Quadro 3.1 resume a especificação básica do Crazyflie 2.1.

Quadro 3.1. Especificação básica do Crazyflie 2.1.

Parâmetro	Valor
Acelerômetro e giroscópio	BMI088
Microcontrolador principal	STM32F405
Comunicação	nRF51822
Banda de rádio	2,4 GHz ISM
Tamanho (LxCxA)	92x92x29 mm
Peso de decolagem	27 g
Tempo de voo	Aprox. 7 minutos

Fonte: Adaptado de Michalski *et al.* (2023).

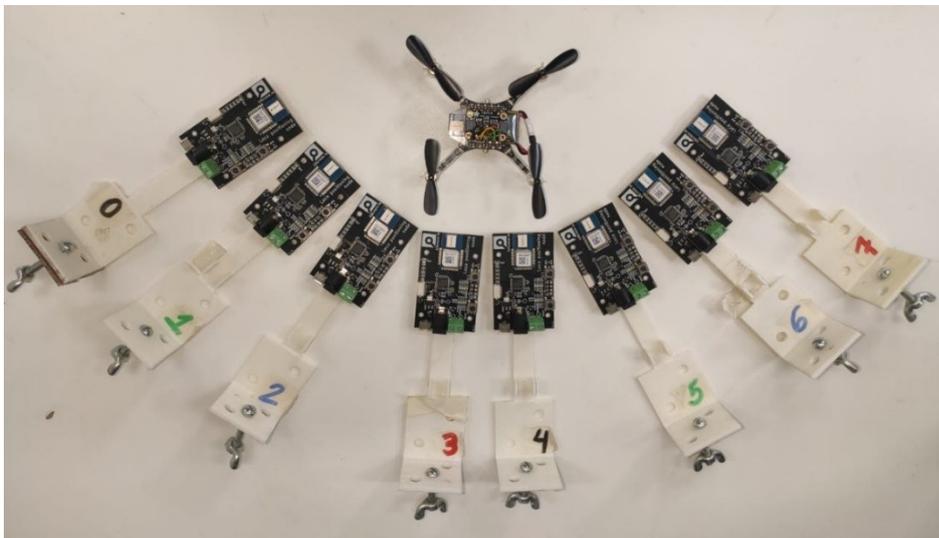
Outra vantagem de utilizar nanoquadricópteros está associada à possibilidade de utilizar enxames de VANTs para aprimorar e acelerar a realização de tarefas específicas (Duisterhof *et al.*, 2022). Além disso, é relevante ressaltar que o fabricante disponibiliza um

sistema de posicionamento local, oferecendo uma solução significativa para um dos principais desafios na pesquisa nesta área: a obtenção precisa da posição da aeronave em ambientes internos.

3.2 Sistema de Posicionamento

Para operações de voo autônomo, é fundamental contar com um suporte de posicionamento de alta precisão. No entanto, a instalação de dispositivos de detecção na parte superior da CF2 impõe restrições significativas às capacidades de estimativa de posição disponíveis. Consequentemente, certas abordagens, como a utilização de câmeras incorporadas, conforme sugerido por Thomas *et al.* (2017), e estações base rotativas de luz infravermelha exploradas por Taffanel *et al.* (2014), tornam-se impraticáveis. Nessa tese foi optado pelo emprego do Sistema de Posicionamento Local (LOCO), ilustrado na Figura 3.4. Esse sistema LOCO faz uso da tecnologia de rádio *Ultra-Wide Band* (UWB) para efetuar a determinação da localização tridimensional de um ou mais dispositivos CF2 no espaço.

Figura 3.4 Equipamentos de sistema de posicionamento local.

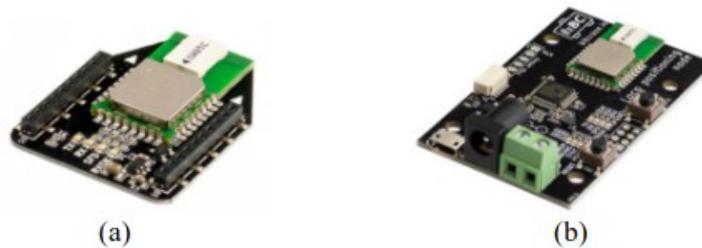


Fonte: Elaborado pela autora.

O sistema LOCO fundamentado no chip *Decawave* DWM1000, disponibiliza uma excelente precisão de posicionamento, alcançando valores da ordem de 10 centímetros, embora tal precisão possa apresentar variações de acordo com a configuração adotada (BITCRAZE, 2023). Essa estrutura se compõe de um marcador (*tag*), que se conecta diretamente à aeronave CF2 por meio das suas interfaces de expansão, além de um conjunto de oito pontos fixos, denominados âncoras.

As âncoras necessitam de uma alimentação externa que varia de 5V a 12V, e cada uma delas consome até 180 mA de corrente. Por outro lado, os módulos receptores devem ser instalados nas aeronaves que serão rastreadas. A Figura 3.5 ilustra um receptor e uma âncora, respectivamente.

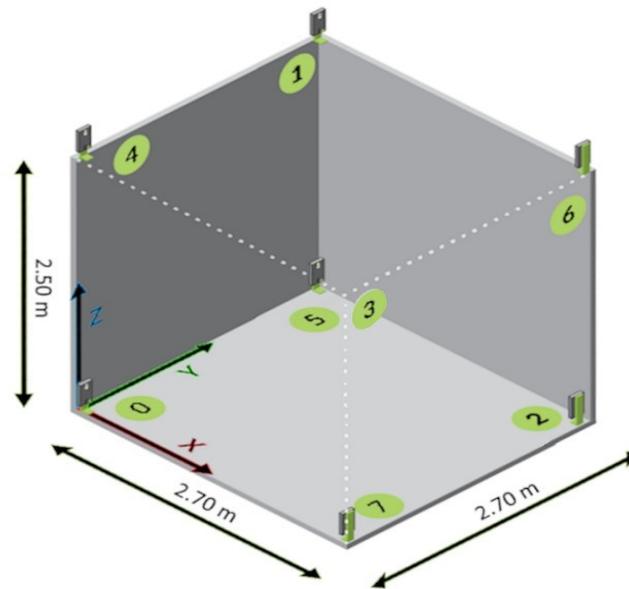
Figura 3.5 Componentes do sistema de posicionamento local: (a) receptor e (b) âncora.



Fonte: Extraído de Lima (2019).

As âncoras foram distribuídas estrategicamente no ambiente de teste. Os números de 0 a 7, associados a cada âncora na Figura 3.4, indicam as posições específicas de instalação das âncoras. Essas posições estão diretamente relacionadas com as marcações numéricas indicadas no arranjo espacial apresentado na Figura 3.6. As marcações numéricas são fundamentais pois eliminam a necessidade de reconfigurar o sistema de posicionamento a cada montagem e desmontagem dos módulos. O sistema de localização local funciona por meio da comunicação de alta frequência entre receptores instalados nas aeronaves e âncoras posicionadas no ambiente. Essas âncoras devem ser instaladas a uma distância mínima de 15 cm das paredes, tetos ou outros obstáculos, a fim de evitar interferências de reflexão. Além disso, é importante notar que o ambiente, idealmente, deve ser livre de áreas côncavas. A disposição das âncoras, conforme mostrado na Figura 3.6, foi possibilitada por suportes fabricados por meio de uma impressora 3D, seguindo os desenhos fornecidos pelo fabricante, e por hastes metálicas do tipo perfil de viga U, utilizadas para a fixação nas dimensões planejadas. Além disso, as distâncias entre as hastes nos vértices, que estabelecem a relação entre os eixos X e Y no espaço de voo, podem ser facilmente ajustadas, uma vez que as hastes foram projetadas no formato de pedestal.

Figura 3.6 Arranjo espacial dos nós no ambiente.



Fonte: Adaptado de Bitcraze (2023).

Outra questão importante sobre esse método de localização espacial é que o sistema LOCO proporciona a capacidade de rastrear extensos volumes de espaço sem a necessidade de linha de visão direta e não é suscetível à interferência da intensa luz solar (BITCRAZE, 2023). É relevante destacar também que o desempenho do posicionamento tridimensional (3D) varia de acordo com a configuração do sistema e as características do ambiente operacional em que se encontra.

O sistema de posicionamento LOCO incorpora três modos de posicionamento: *Two Way Ranging* (TWR), *Time Difference of Arrival 2* (TDoA 2) e *Time Difference of Arrival 3* (TDoA 3).

No modo TWR, a *tag* emite sequencialmente mensagens para as âncoras, com base nas quais é calculada a distância até cada âncora, permitindo, assim, a estimativa da posição tridimensional da aeronave. Entretanto, é importante ressaltar que esse modo é capaz de operar com apenas seis âncoras e, em cada tentativa, pode estimar apenas a posição de uma única *tag*, tornando-o inadequado para operações envolvendo enxames de VANTs (BITCRAZE, 2023).

Os modos TDoA 2 e TDoA 3 operam de maneira semelhante, com as âncoras transmitindo continuamente pacotes de sincronização para as *tags*. A principal distinção entre esses dois modos reside no fato de que, no TDoA 2, os pacotes são enviados em intervalos

fixos, enquanto no TDoA 3, o envio dos pacotes é aleatório, tornando-o um pouco mais suscetível a ruídos em comparação aos outros dois modos (BITCRAZE, 2023).

No contexto desse projeto, foi selecionado o modo TDoA 2, motivados por seu desempenho ser superior em relação ao modo TDoA 3. Um aspecto interessante do sistema LOCO é a inclusão de todas as informações essenciais para o cálculo da localização na *tag*, permitindo, assim, a estimativa da posição diretamente a bordo do próprio CF2.

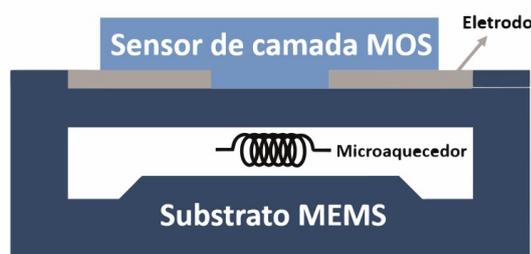
3.3 Sensor de detecção de VOC

O sensor MOX surgiu há décadas, quando se observou que a resistência do Cu₂O era afetada pela adsorção de vapor de água (Seiyama & Kagawa, 1966). No entanto, o verdadeiro avanço na tecnologia dos sensores semicondutores começou com pesquisas sobre filmes finos de ZnO e SnO₂. Esses estudos resultaram nos primeiros sensores comerciais à base de SnO₂ para detecção de gases inflamáveis, marcando o início da aplicação prática dos sensores semicondutores (Nazemi *et al.*, 2019).

O mecanismo de transdução dos sensores MOX envolve um óxido de metal que modifica suas propriedades elétricas em resposta à exposição a diferentes gases ambientais. Nos sensores comerciais, a propriedade predominantemente medida nos óxidos de metal é a resistência ou condutividade (Spinelle *et al.*, 2017).

A variação na condutividade ocorre devido às mudanças na camada de depleção nos limites dos grãos, presentes nos grãos de óxido de metal interconectados na camada de detecção ativa do dispositivo. A interação entre essa camada e os analitos alvo em temperaturas elevadas, modula as barreiras de energia para portadores de carga livres, resultando em uma alteração na condutividade dos materiais de detecção. Os sensores de gás MOX utilizam materiais de detecção específicos depositados em um conjunto de eletrodos, juntamente com um micro aquecedor necessário, eletricamente separado do elemento sensor por uma camada isolante (Nazemi *et al.*, 2019). A Figura 3.7 apresenta uma visão esquemática de um sensor MOX.

Figura 3.7 Visão esquemática de um sensor de óxido de metal.



Fonte: Adaptado de Nazemi (2019).

O funcionamento do sensor baseia-se na correlação entre a resistência e a barreira de energia, a qual varia conforme a densidade de portadores de carga nos limites dos grãos. Em temperaturas elevadas, ocorre a adsorção de oxigênio na superfície do MOS. Esse oxigênio adsorvido captura elétrons da banda de condução, resultando em uma alteração na concentração de portadores de carga que afeta a resistência da camada de detecção MOS. Essa mudança na resistência do sensor é diretamente proporcional à concentração dos analitos expostos (Donarelli & Ottaviano, 2018).

O *design* em micronível do sensor MOX oferece uma vantagem adicional: utiliza finas camadas de óxido de silício com aquecedores embutidos para minimizar o consumo de energia. Esse aspecto simplifica a integração desses sensores com a eletrônica moderna e sua inclusão em pacotes eletrônicos padrão, tornando a detecção de gases mais acessível e eficiente (Covington *et al.*, 2021).

No mercado, uma grande variedade de sensores MOX para VOC encontra-se comercialmente disponível (Spinelle *et al.*, 2017). Entre as empresas mais relevantes nesse setor estão a *Bosch*, *ScioSense*, *SGX SensorTec* e *Sensirion*. Essa diversidade de fornecedores reflete o progresso e a disponibilidade de tecnologias variadas para o monitoramento de VOC, atendendo a uma variedade de requisitos e aplicações. Para fornecer uma visão abrangente dessas opções, a Tabela 3.1 apresenta as soluções mais recentes de sensores de gás VOC integrados disponíveis no mercado para cada um desses fabricantes, juntamente com as suas especificações básicas.

Tabela 3.1. Soluções de sensores VOC integrados e suas especificações básicas.

Sensor	Fabricante	Interface	Tamanho em mm ³	Taxa de Amostragem	Tempo de resposta	Tensão de alimentação
BME688	Bosch	I2C/SPI	3x3x0,9	1 Hz	0,75 s	1,71–3,6 V
CCS811	ScioSense	I2C	2,7x4x0,6	4 Hz máx	0,25 s	1,8–3,6 V
Mics-5524	SGX SensorTec	I2C	5x7x1,55	1 Hz	2 s	2,4 V
ENS160	ScioSense	I2C/SPI	3x3x0,9	10 Hz	1 s	1,8–3,6 V
SGP40	Sensirion	I2C	2,44x2,44x0,85	1 Hz máx	1 s	1,7–3,6 V

Fonte: Elaborado pela autora.

As considerações físicas relacionadas à interface de comunicação, tamanho, tensão de alimentação, taxa de amostragem, tempo de resposta e facilidade de implementação desempenharam um papel crucial na escolha do sensor de gás para esse projeto. Nesse contexto, o sensor de gás SGP40 (Stäfa, Suíça) da empresa *Sensirion* (Figura 3.8) foi escolhido por sua capacidade de identificação de componentes de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) presentes no ambiente, bem como por sua plena conformidade com todos os critérios essenciais para a integração bem-sucedida no nanoquadricóptero CF2. Adicionalmente, vale enfatizar que o SGP40 representa a versão mais atualizada disponibilizada no mercado pelo fabricante *Sensirion*, consolidando ainda mais a seleção para esse projeto.

Figura 3.8 Elemento sensor SGP40.

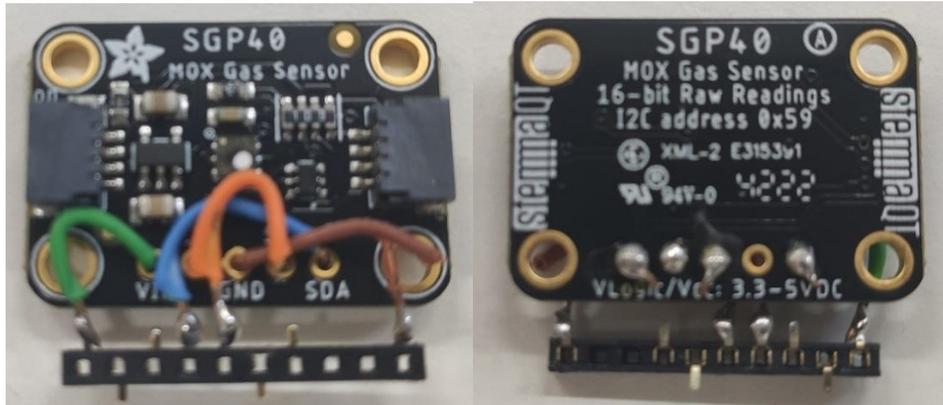


Fonte: Extraído de Sensirion (2023).

3.4 Módulo de comunicação do CF2 com o sensor de gás

Com o intuito de facilitar a implementação e conexão com o CF2, optou-se por adquirir uma placa de comunicação dedicada. Essa placa possui circuitos integrados cuidadosamente projetados para simplificar a interação entre o sensor e o microprocessador do CF2, operando com o protocolo de comunicação I2C. A disposição da placa de comunicação I2C, demonstrada na Figura 3.9, permite uma integração fluida com o sensor de gás SGP40, apresentando dimensões totais de 27 x 20 mm.

Figura 3.9 Módulo sensor SGP40.



Fonte: Elaborado pela autora.

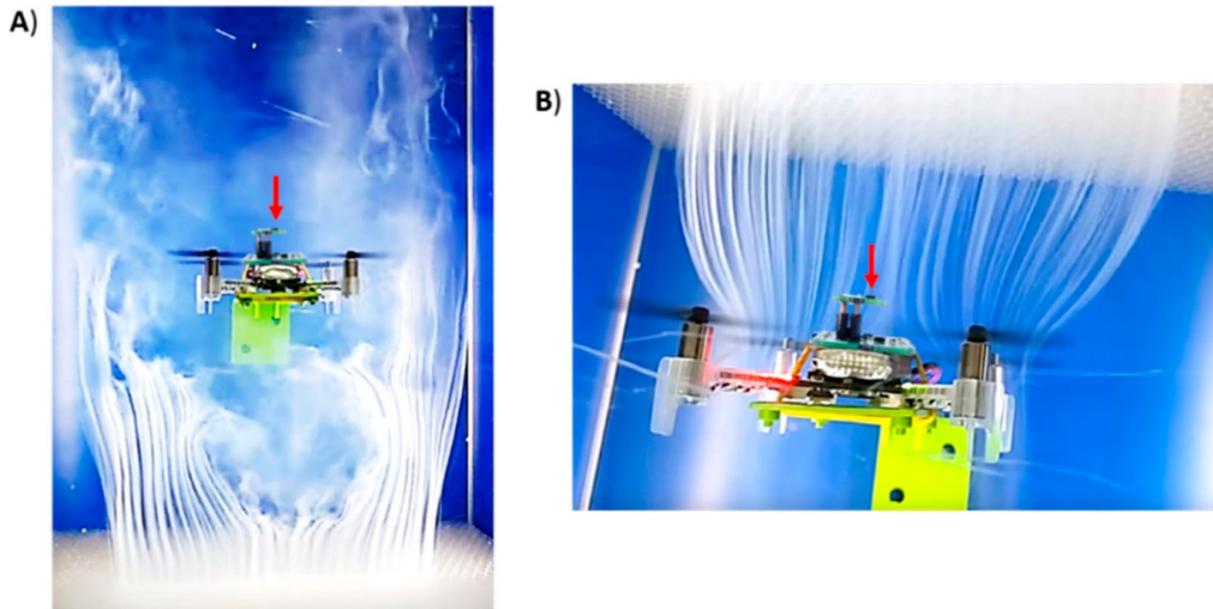
As vantagens adicionais proporcionadas por essa placa para uma integração perfeita com o CF2 são diversas. Estes benefícios incluem pinos e conectores de fácil acesso, além da presença de um regulador de tensão e dispositivos de nivelamento de sinal que se adaptam aos sistemas de 3,3 V e 5 V. Esse aspecto eletrônico assegura total compatibilidade com a fonte de alimentação fornecida pelo CF2.

Durante o processo de integração da interface de comunicação do sensor de gás SGP40 no CF2, uma consideração de extrema importância concentra-se na determinação da posição de montagem dos componentes. Alguns trabalhos, como Burgués *et al.* (2019), Neumann *et al.* (2019a), Anderson *et al.* (2020), Duisterhof *et al.* (2022), Souza (2022) e Bouras *et al.* (2023) afixaram o sensor na parte superior do VANT. Outros estudos, como o de Ercolani & Martinoli (2020), apresentaram resultados de testes nos quais o sensor embarcado logo abaixo do centro de gravidade do VANT na parte inferior obteve maior sucesso. Já as pesquisas de Shigaki *et al.* (2022) e Terutsuki *et al.* (2021) constataram que a posição ideal para o posicionamento dos sensores é na parte frontal, próxima aos rotores dianteiros do veículo.

O estudo de Burgués *et al.* (2019) revela que as hélices do nanoquadricópteros têm um impacto significativo na distribuição de gás nas proximidades, afetando os sinais dos sensores de gás MOX instalados no corpo do nanoquadricóptero. De acordo com os autores, esse impacto causa um aumento na concentração média e na frequência de detecção quando o VANT está em operação. A justificativa é que as hélices geram um fluxo descendente (Figura 3.10(A)) que cria turbulência no gás ao redor do quadricóptero, possivelmente aumentando a concentração de fundo do gás de interesse. À medida que o gás se dispersa em torno do

quadricóptero, as hélices arrastam as plumas de gás em direção ao sensor MOX (Figura 3.10(B)), contribuindo para o aumento na frequência de detecção.

Figura 3.10 Aerodinâmica do nanoquadricóptero Crazyflie.



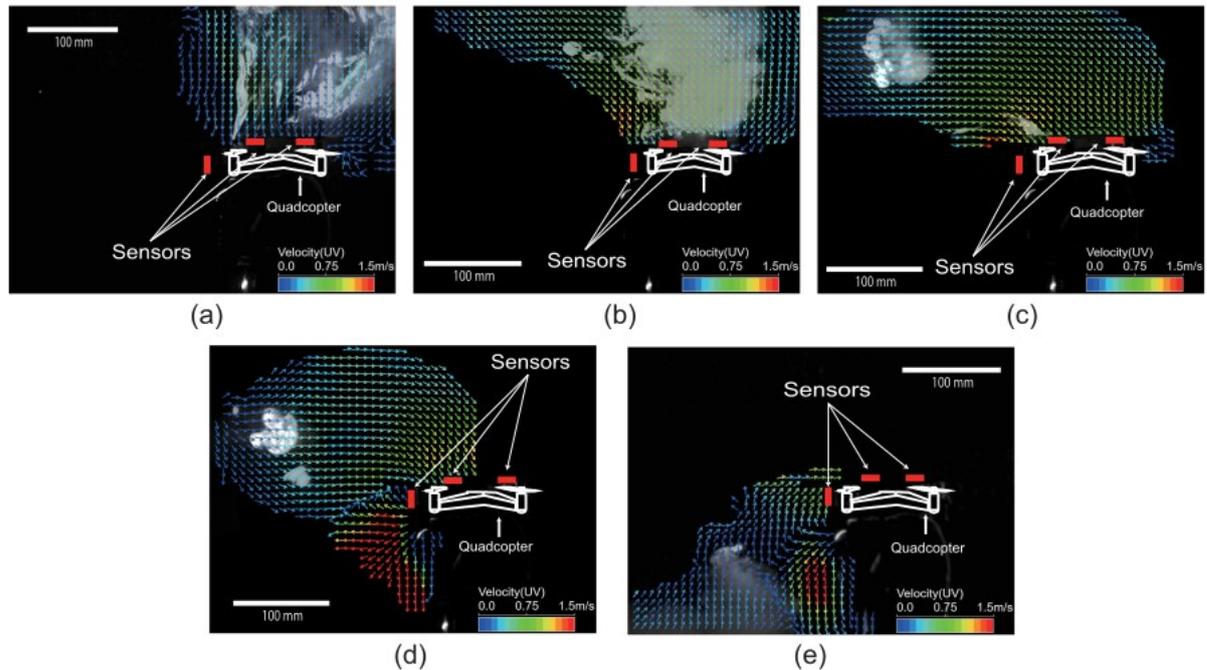
Fonte: Extraído de Burgués *et al.*, (2019).

A Figura 3.10 apresenta a aerodinâmica do Crazyflie quando os quatro rotores estão em funcionamento. Esta imagem foi obtida através do túnel de vento *Desk breeze* (Cortesia de *Bitcraze AB*) (Burgués *et al.*, 2019). O drone é fixado em uma das paredes do túnel utilizando um suporte impresso em 3D, enquanto a névoa de gelo seco é emitida tanto de (A) abaixo quanto de (B) acima do nanoquadricóptero. Além disso, a Figura 3.10 ilustra a descida das hélices e como parte da neblina alcança o sensor de gás MOX, indicado pela seta vermelha.

Em Shigaki *et al.* (2022), os autores desenvolveram e testaram empiricamente uma abordagem para posicionar sensores de odor e implementar um algoritmo utilizando o efeito aero-olfatório de um nanoquadricóptero, com o objetivo de solucionar o desafio do rastreamento tridimensional de plumas químicas. Para avaliar a direção de chegada de produtos químicos em várias alturas, os autores empregaram a técnica de velocimetria de imagem de partículas (*Particle Image Velocimetry - PIV*), uma tecnologia usada para visualização de fluxo de ar. No método PIV, as partículas que se movem junto com um fluido são misturadas em um campo de fluxo. Conforme ilustrado na Figura 3.11, o nanoquadricóptero foi observado lateralmente, e a análise do fluxo de ar ao seu redor foi conduzida enquanto as alturas da fonte de odor foram ajustadas. O experimento foi conduzido

mantendo-se a altura do quadricóptero como referência (0 m), enquanto a altura variável da fonte de partículas foi ajustada em incrementos de 0,1 m, desde 0,3 m até -0,1 m.

Figura 3.11 Aerodinâmica pelo método PIV.

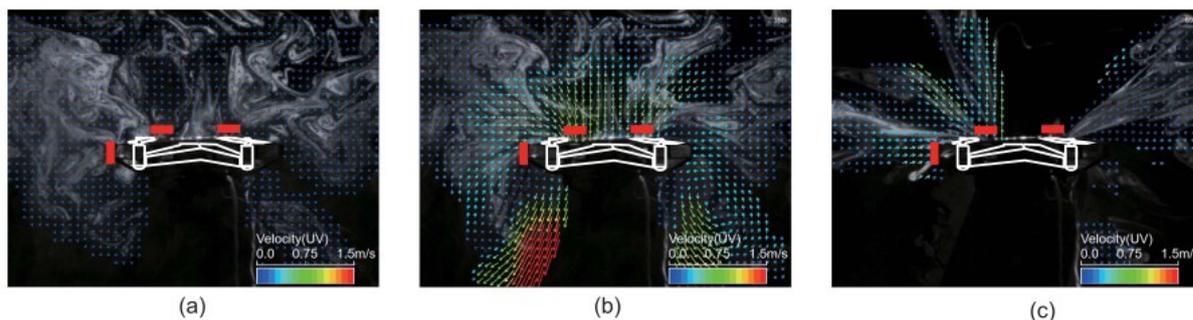


Fonte: Extraído de Shigaki *et al.* (2022).

As Figuras 3.11(a), (b), (c), (d) e (e) mostram os resultados para diferentes distâncias da fonte de fumaça: 0,3 m, 0,2 m, 0,1 m, 0 m e -0,1 m, respectivamente. A linha branca indica a posição do quadricóptero, enquanto a área vermelha destaca uma posição potencial para o arranjo dos sensores, identificada a partir da análise PIV. Os pesquisadores observaram que, quando a fonte de partículas está posicionada acima do quadricóptero Figura 3.11 (a), (b) e (c), as partículas se concentram na superfície superior de mesmo. Por outro lado, quando a altura da fonte de partículas é igual ou inferior à do quadricóptero Figura 3.11 (d) e (e), as partículas se concentram na frente do VANT. No entanto, se o odor se originar mais abaixo, o rastro do quadricóptero pode interferir e impedir que o odor chegue até o sensor.

Em outro experimento realizado no mesmo contexto, Shigaki *et al.* (2022) exploraram os efeitos do quadricóptero imerso em uma nuvem de odor. Como ilustrado na Figura 3.12, nesse experimento, a fumaça envolveu o quadricóptero quando suas hélices estavam desligadas, o comportamento do fluxo de ar decorrente do início da rotação das hélices foi analisado. As Figuras 3.12 (a)-(c) exibem os resultados obtidos antes do início da rotação das hélices, aproximadamente 0,1 e 0,5 segundos após o início da rotação, respectivamente.

Figura 3.12 Aerodinâmica imediatamente após o início da rotação das hélices.



Fonte: Extraído de Shigaki *et al.* (2022).

Inicialmente, a rotação das hélices atrai o fluxo de ar de todas as direções; no entanto, a fumaça próxima ao centro de gravidade do quadricóptero gradativamente se dissipa, resultando eventualmente na retirada da fumaça apenas na direção horizontal do aparelho. Assim, o efeito aero-olfatório demonstra a capacidade de uma ingestão ordenada de fumaça, mesmo quando em meio a uma grande pluma de odor. Essa característica é muito importante, pois mesmo quando o quadricóptero está em uma grande pluma de odor, onde é difícil determinar a direção do odor, ao sair imediatamente da pluma, ela ajuda a manter o desempenho de rastreamento próximo à fonte de odor (Shigaki *et al.*, 2022).

Portanto, não há um consenso absoluto a respeito da posição ideal de instalação do sensor de gás no CF2. Para essa tese, optou-se por fixar o sensor de gás na porção superior do corpo da aeronave, alinhado diretamente acima de seu centro de gravidade. Além de simplificar o controle de voo e equilibrar o peso no CF2, essa escolha é justificada pela influência benéfica das correntes de ar geradas pelas hélices, que promovem o transporte eficiente das moléculas de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) da atmosfera até a superfície do sensor (Bouras *et al.*, 2023), (Baptista *et al.*, 2023). Além disso, essa disposição apresenta vantagens significativas na montagem e desmontagem devido à facilidade na configuração das conexões com o veículo. Destaca-se que, na parte superior do veículo, está posicionada uma *tag* do sistema de posicionamento local, proporcionando uma disposição estratégica para o sensor e a *tag* do sistema de posicionamento local. Portanto, o arranjo descrito não apenas melhora consideravelmente a eficácia da detecção de VOC, mas também simplifica os procedimentos de montagem, manutenção e integração com o veículo. A Figura 3.13 mostra o sensor de gás embarcado no CF2, juntamente com o *tag* do sistema de posicionamento.

Figura 3.13 CF2 equipado com *tag* do sistema de posicionamento local e o sensor de gás.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.5 Sistema de fonte de odor

Durante os experimentos, o gás identificado resulta da evaporação do álcool etanol absoluto, estimulada pelo borbulhamento causado pela injeção de ar em líquido confinado. O etanol é um líquido transparente, volátil e incolor, com um ponto de fusão de $-114\text{ }^{\circ}\text{C}$ e um ponto de ebulição de $78,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. É importante observar que álcool etílico possui propensão em se acumular na parte inferior do ambiente, um fenômeno atribuído à densidade relativa do vapor absoluto de álcool etílico, que é de 1,6 (International Labour Organization, 2023). A densidade relativa do vapor é definida como a razão entre o peso do vapor e o peso de um volume equivalente de ar seco nas mesmas condições de temperatura e pressão, explicando, assim, a maior concentração de vapor de etanol nas camadas mais baixas da atmosfera.

O etanol tem odor distintivo e é empregado na síntese de ácido acético, na fabricação de bebidas, na produção de essências e como matéria-prima para corantes, tintas e cosméticos. Na área médica, é usado como desinfetante (Lin *et al.*, 2019). Entretanto, apesar do uso em larga escala, a exposição aos vapores de etanol pode causar tonturas, dores de cabeça, fadiga e náuseas (Leonardi *et al.*, 2016). É importante ressaltar também que a mistura de vapores de etanol com o ar pode ser explosiva, tornando-se inflamável em concentrações entre 3,3% e 19% (FISPQ - Etanol Anidro Combustível EAC, 2019). Isso posto, destaca-se a necessidade de monitoramento rigoroso da concentração de etanol em ambientes industriais e durante o transporte rodoviário. A escolha do etanol como gás de interesse nesta pesquisa se baseia em sua disponibilidade, relativa segurança em comparação com outros VOC, propriedades de evaporação favoráveis em condições ambientais e facilidade de detecção pelo sensor MOX.

O desenvolvimento do sistema emulador de vazamento de etanol envolveu uma análise detalhada de diversos estudos encontrados na literatura. Essas pesquisas foram fonte de inspiração fundamental para o projeto, e suas contribuições estão documentadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 Pesquisa bibliográfica sobre fontes de odor.

Trabalho	Substâncias	Materiais e Métodos
Ercolani <i>et al.</i> (2020)	Etanol	O gás é liberado por meio de um dispositivo de bombeamento elétrico estacionário, com duas taxas de liberação: 0,5 L/min (alta) e 0,25 L/min (baixa). Essas taxas correspondem à mistura de ar e etanol evaporado. A proporção específica de etanol para ar não é conhecida.
Rahbar <i>et al.</i> (2017)	Acetona	A fonte de odor empregada consiste em um dispositivo de bombeamento elétrico estacionário que vaporiza acetona líquida e o libera no ambiente por meio de uma mangueira transparente. Embora não seja possível controlar precisamente a quantidade de gás liberado em ppm com este dispositivo, é possível ajustar a taxa de liberação definindo uma porcentagem da potência da bomba. Neste estudo, foram conduzidos experimentos com taxas de liberação de 8% (baixa) e 18% (alta).
Terutsuki <i>et al.</i> (2021)	<i>Bombykol</i> (feromônio sexual feminino de mariposa)	<i>Bombykol</i> dissolvido em hexano (96,0% de pureza) foi aplicado em papel de filtro e inserido em um tubo de vidro (diâmetro interno: 5 mm; diâmetro externo: 7 mm; comprimento: 100 mm). Um fluxo de ar, gerado por uma bomba de ar compacta (NUP-1; AS ONE Corporation, Osaka, Japão), foi filtrado através de algodão, grânulos de carvão ativado e água destilada antes de ser direcionado para o tubo de vidro para produzir ar puro. A concentração de odorantes neste estudo foi expressa como a quantidade de líquido aplicada ao papel de filtro no tubo de vidro.
Burgués <i>et al.</i> (2019)	Etanol	Um vazamento de gás foi emulado colocando-se um pequeno béquer com 200 mL de etanol 96% em diferentes locais. Um guardanapo de papel e uma

		ventoinha foram usados para facilitar a evaporação. Os experimentos começaram cinco minutos após configurar a fonte e ligar o ventilador DC e o borbulhador.
Souza (2022)	Etanol	O etanol líquido, com uma concentração de 70%, foi colocado em um recipiente com formato cilíndrico aproximado, medindo 11 cm de altura e 6 cm de diâmetro. Um papel toalha, com dimensões de 12 cm de comprimento e 4 cm de largura, foi posicionado em contato com o etanol para facilitar a evaporação. Para simular uma distribuição de gás turbulenta, semelhante a um vazamento sob pressão, foi utilizado um <i>cooler</i> de microcomputador com um diâmetro de uma polegada.
Shigaki & Fikri (2018)	Etanol	Foi instalada uma porta de descarga de etanol atrás do ventilador no lado de pressão, consistindo em um tubo de vidro com diâmetro de 5 mm, onde um papel filtro (10 × 10 mm ²) com etanol 99,5% (50 µL) foi inserido. Para liberar jatos de etanol, foi utilizada uma válvula solenoide, com <i>puffs</i> liberados a uma taxa de aproximadamente 1,0 L/min. Um ventilador foi colocado atrás do frasco coletor para dispersar o etanol no ar. No experimento, o tempo de injeção de ar no frasco coletor foi controlado por uma válvula solenoide, operando em um ciclo de 0,1 Hz (aberta por 1 s, fechada por 9 s).

Fonte: Elaborado pela autora.

Com o objetivo de criar um sistema que fosse tanto simples de construir quanto economicamente viável, foram selecionados os materiais disponíveis e de fácil manuseio. Também foi uma preocupação evitar a dispersão excessiva do gás no ambiente, visando facilitar a identificação da localização precisa da fonte.

Inicialmente, o etanol líquido foi armazenado em um recipiente de vidro com capacidade aproximada de 200 ml. Uma mangueira acoplada na saída de um ventilador foi introduzida no líquido. Esse sistema de borbulhamento foi projetado para intensificar o processo de evaporação do etanol líquido, acelerando sua dispersão. Outra mangueira, instalada dentro do frasco de vidro e com nível mínimo ligeiramente acima do líquido, foi utilizada para direcionar o fluxo de gás de etanol para as posições de interesse. O conjunto completo usado para criar a fonte de odor inclui um ventilador, um adaptador produzido por

impressora 3D para direcionar o fluxo de ar gerado pelo ventilador em direção ao recipiente de etanol, e duas mangueiras transparentes, uma para borbulhamento e outra para conduzir o vapor resultante da evaporação do álcool etílico. A Figura 3.14 ilustra o sistema de geração da fonte de odor, devidamente montado.

Figura 3.14 Sistema de fonte de odor.



Fonte: Elaborado pela autora.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS

Neste capítulo será discutido o planejamento dos ensaios, o limite de detecção, planejamento de trajetória e o *software* desenvolvido durante esse trabalho. Este capítulo visa proporcionar uma visão abrangente e detalhada dos processos envolvidos na implementação da solução proposta.

4.1 Planejamento dos Ensaios

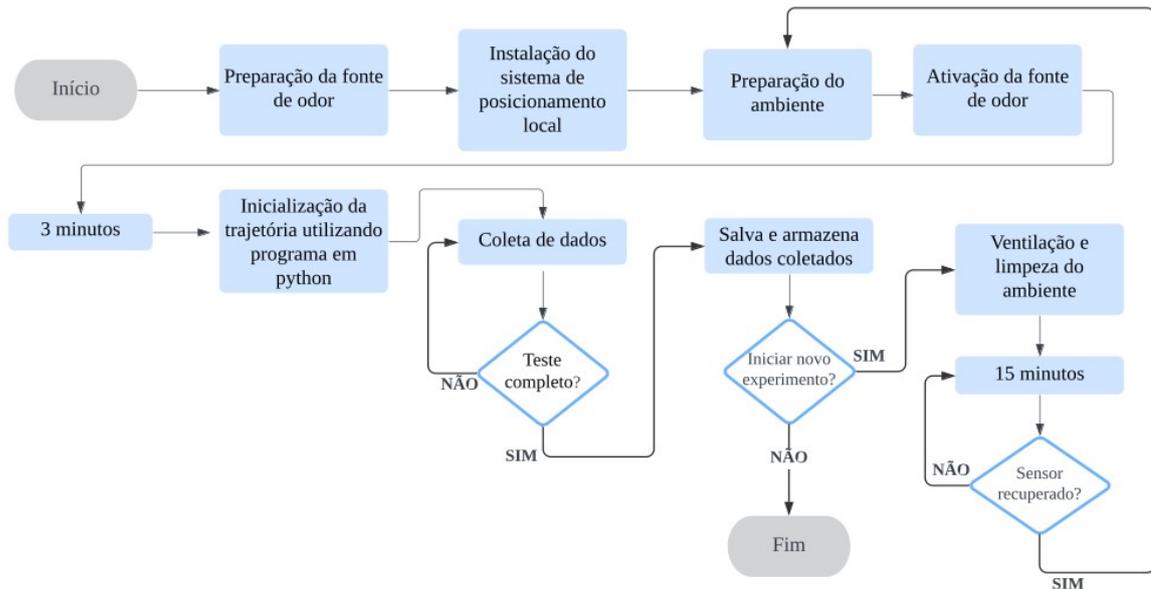
Com o objetivo de analisar o comportamento do sistema proposto foram realizados testes em diferentes cenários. No primeiro cenário, o percurso foi limitado a uma área de teste com dimensões de 2,7 metros nas direções X e Y e 2,5 metros de altura. No segundo cenário a área de testes foi ampliada alterando apenas a distância entre as hastes no eixo Y de 2,7 metros para 5,1 metros.

Antes de iniciar o experimento de voo, o ventilador da fonte de odor foi ativado por um período de 3 minutos. Isso permitiu que o vapor de álcool etílico percorresse uma mangueira com 3 metros de comprimento, resultando na formação de uma pluma ao redor da saída de ar da fonte de odor. Esse procedimento facilitou a dispersão controlada do vapor, tornando-o detectável pelo sensor de gás, sem se espalhar indesejadamente por todo o ambiente. Devido à dificuldade em mensurar a quantidade de gás consumida em cada ensaio, a concentração do álcool etílico na mistura gerada pela fonte de odor, composta por ar e álcool etílico, permaneceu indeterminada ao longo dos experimentos.

Durante o voo e, simultaneamente, registro dos dados, todas as janelas e portas permaneceram fechadas e o ar-condicionado da sala foi desativado. Caso se opte por realizar um novo experimento na sequência, foi estabelecido um intervalo mínimo de 15 minutos para realizar a limpeza e ventilação do ambiente. Durante esse período de intervalo, a porta é aberta, e o sistema de ar-condicionado é configurado para operar no modo de ventilação, facilitando a exaustão de uma porção substancial do contaminante gasoso sem causar alterações significativas na temperatura ambiente da sala. Esse procedimento prepara o local adequadamente para o próximo experimento.

Com o propósito de assegurar a devida recuperação dos sensores de gás, antes de cada experimento, realizou-se um teste para verificar se o sinal do sensor se encontrava a um nível máximo de 15% de variação em relação ao seu estado inicial. Além disso, foram verificadas as condições de umidade e temperatura do ambiente com um termo-higrômetro digital para garantir que permanecessem dentro dos parâmetros recomendados pelo fabricante: temperatura entre -10°C e 50°C e umidade entre 0% e 90%. Para informações mais precisas sobre condições de operação, encontram-se disponíveis no datasheet do sensor SGP40 curvas com as regiões nas quais é necessário recurso de compensação de umidade (Sensirion, 2023). A metodologia descrita está delineada no diagrama de fluxo de trabalho apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 Diagrama de fluxo de trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

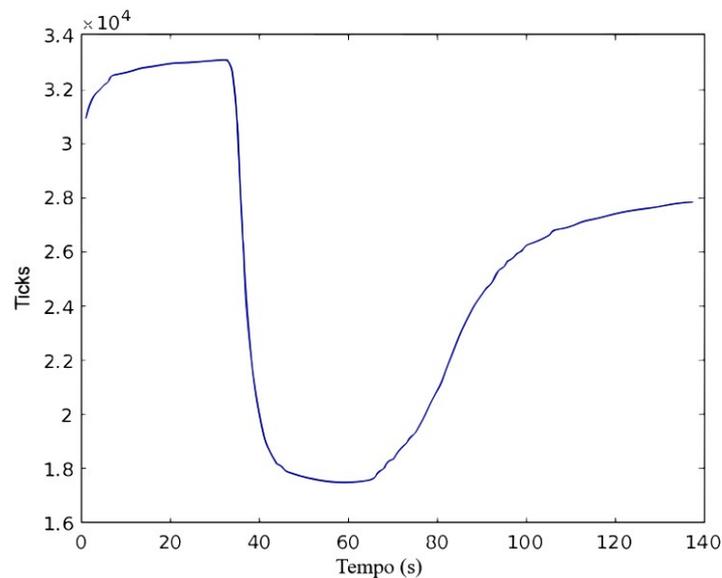
4.2 Caracterização da resposta do sensor

Devido ao seu formato compacto, alta sensibilidade, custo acessível e habilidade em detectar uma ampla variedade de gases, os sensores do tipo MOX têm ganhado popularidade em aplicações que envolvem integração com nanoquadrópteros. No entanto, esses sensores enfrentam um desafio, conforme mapeado por Burgués *et al.* (2019): o tempo de recuperação prolongado (10 a 30 segundos), em contraste com a rápida resolução temporal do estímulo químico (na ordem de milissegundos). Além disso, os sensores MOX exibem uma característica de desvio de sinal, traduzindo-se em um erro sistemático que reduz a eficiência e confiabilidade em algumas aplicações. Segundo Palacín *et al.* (2019), quando o sensor opera

ininterruptamente por mais de 12 horas, ele experimenta uma variação gradual e imprevisível na resposta do sinal, mesmo quando submetido constantemente às mesmas condições.

Portanto, realizou-se uma análise preliminar com o objetivo de avaliar o impacto da exposição ao vapor de álcool etílico na resposta do sensor SGP40, antecedendo os experimentos com o CF2 em conjunto com o sensor de gás durante o voo. Para conduzir esse teste inicial de caracterização da resposta do sensor, ele foi posicionado nas proximidades da abertura de um recipiente de vidro contendo 50 ml de etanol absoluto. Os dados resultantes desta avaliação preliminar são apresentados de forma gráfica na Figura 4.2.

Figura 4.2 Gráfico de reação do sensor de Gás SGP40 à exposição de álcool etílico absoluto.



Fonte: Elaborado pela autora.

O sinal de saída digital gerado pelo SGP40, expresso em unidades de "ticks" e representando um valor de 16 bits, reflete a estimativa do sensor quanto às concentrações de VOC presentes no ambiente, em uma faixa que abrange de 0 a 65.535 unidades (Sensirion, 2023). É relevante frisar que uma correlação quantitativa entre os "ticks" e as concentrações reais de VOC pode ser estabelecida por meio de um processo de calibração utilizando gases de referência com concentrações conhecidas. Vale ressaltar que o sinal lido pelo sensor diminui durante a exposição, estabelecendo uma relação inversamente proporcional à concentração de álcool etílico presente no ar.

O sensor foi posicionado na extremidade de um recipiente de vidro, mantendo-se nessa localização por cerca de 20 segundos. Ele foi introduzido aos 40 segundos e retirado aos 60 segundos. Observando a Figura 4.2, destaca-se uma considerável redução na saída do

sensor, caindo de 32,892 para 17,748 "ticks" (o valor mínimo registrado nesse experimento) em resposta à exposição ao vapor de álcool etílico. Esse declínio marcante na saída do sensor evidencia de maneira clara a sensibilidade do dispositivo ao álcool etílico, destacando sua capacidade de detecção e resposta a essa substância específica.

No que se refere ao tempo de resposta, o sensor demonstra a capacidade de detectar quase instantaneamente a presença do VOC analisado, exigindo apenas 5 segundos para alcançar a leitura mínima. Após ser removido da proximidade do vapor de álcool etílico, é observada uma recuperação em aproximadamente 30 segundos, alcançando um nível inferior ao valor inicial registrado antes da exposição ao gás. Ressalta-se que o tempo de recuperação pode variar consideravelmente, dependendo da concentração de VOC à qual o sensor foi exposto, necessitando de menos tempo para recuperação em concentrações mais baixas (Luo *et al.*, 2017). Esse teste de caracterização desempenhou um papel essencial no planejamento do experimento e na compreensão dos valores obtidos pelo sinal lido durante a exposição à fonte de odor.

4.3 Limite de Detecção

Na maioria dos algoritmos de localização de fonte de gás (GSL), é comum a utilização de um limiar de detecção como critério para distinguir entre leituras do sensor que possam ser atribuídas à pluma de gás e aquelas que são devido a ruído de fundo (Burgués *et al.*, 2021). No entanto, muitos estudos não incluem uma descrição clara dos critérios utilizados para classificar detecções de gás. Além disso, é importante destacar que depender apenas desse limiar pode levar a uma parametrização ineficiente.

Em consonância com a abordagem delineada por Burgués *et al.* (2019), optou-se por empregar a variação mínima do sinal como um parâmetro de detecção, denominado "bouts". A estimativa desse valor foi conduzida da seguinte maneira:

$$bthr = \mu + 3\sigma, \quad (4.1)$$

Onde μ e σ são a média estimada e o desvio padrão da distribuição das amplitudes dos "bouts" detectados na linha de base do sensor (na ausência de gás). Essa metodologia foi aplicada com sucesso para reduzir alarmes falsos e aprimorar a confiabilidade geral dos resultados obtidos. Variações inferiores ao limite estabelecido pela Equação 4.1 foram tratadas como ruídos de leitura e, portanto, não foram consideradas úteis para a localização da fonte de odor.

4.4 Planejamento de Trajetória

A robótica olfativa móvel destaca-se por suas duas tarefas centrais: localizar a fonte de gás e mapear sua distribuição. Na busca por aprimorar a compreensão e eficácia dos algoritmos dedicados à localização de fontes de gás, observamos três abordagens principais: rastreamento de plumas reativas, modelagem de plumas e métodos baseados em mapas (Palacín *et al.*, 2019). Entretanto, a complexidade surge quando enfrentamos ambientes com múltiplas fontes de vazamento de gás.

Estratégias relacionadas ao mapeamento da distribuição demandam exploração abrangente do ambiente, integrando dados de diversas medições para criar representações mais precisas. Isso se torna especialmente crucial ao considerar ambientes dinâmicos e em constante mudança, onde a adaptação a variações na concentração de gases e a capacidade de discernir entre diferentes fontes se tornam desafios significativos. Entretanto, devido às restrições energéticas, os drones possuem limitações nos recursos de detecção e demandam um planejamento de missão eficaz para realizar medições nos locais de detecção mais informativos dentro do seu tempo de voo restrito (Cabreira *et al.*, 2019).

Nesse contexto, é crucial ressaltar o desenvolvimento contínuo de métodos destinados a superar os desafios mencionados. Ao invés de concentrar-se apenas no rastreamento da pluma ou na identificação precisa da região focal, uma abordagem prática envolve a utilização de VANTs programados para seguir uma rota predefinida, explorando eficientemente uma área de interesse específica. Esse processo inicia-se com a exploração da área de interesse e a coleta de dados relevantes. A tomada de decisões é, então, fundamentada no Mapa de Distribuição de Gás (GDM), resultado da abrangente varredura da área de interesse. Essa estratégia não apenas otimiza a eficácia da detecção, mas também proporciona uma abordagem mais precisa e eficiente na gestão de cenários complexos de dispersão de gases.

Assim, considerando os conceitos apresentados, as limitações de voo do CF2, juntamente com as características observadas na sensibilidade do sensor SGP40 durante os testes conjuntos, definiram-se as seguintes premissas para o planejamento da trajetória:

(1) Detectar fontes de álcool etílico em altitudes muito próximas do solo torna-se consideravelmente desafiador devido à propensão do álcool etílico em se acumular na parte inferior do ambiente.

(2) A fonte de odor gerada pelo borbulhamento do ar e direcionada por meio de uma mangueira auxilia na formação de uma pluma mais densa e concentrada próxima ao ponto de

saída do gás, limitando sua dispersão pelo ambiente. Isso, por sua vez, facilita a localização dessa fonte.

(3) Nas condições apresentadas neste estudo, o vapor de álcool etílico não é liberado em quantidade e tempo suficiente para se difundir por todo o ambiente.

(4) O CF2 deve, preferencialmente, voar a altitudes inferiores à da fonte de odor, aproveitando o fluxo de ar descendente gerado pelo movimento das hélices, com o objetivo de aumentar a probabilidade de detecção bem-sucedida de compostos voláteis.

(5) Dado o tamanho reduzido do nanoquadricóptero CF2, é crucial considerar as limitações em termos de velocidade e da distância entre as posições programadas de voo.

Fundamentadas nessas premissas e nos argumentos previamente apresentados, as trajetórias propostas envolveram a sequência de pontos predefinidos para percorrer todo o perímetro da área de interesse, com mudanças graduais de elevação. Essa estratégia teve como objetivo mapear os níveis de concentração de gases em várias posições do ambiente e, assim, estabelecer uma relação entre os níveis de detecção do sensor e a localização da fonte de odor.

Quando comparamos a estratégia de cobertura completa do ambiente com abordagens guiadas que convergem diretamente para a fonte, percebemos três vantagens:

(1) Diversos experimentos destacaram que a localização da fonte não necessariamente corresponde a uma região com a maior concentração média de gás (Bouras *et al.*, 2023). Portanto, um modelo baseado em GDM se revela valioso ao identificar vários picos ou outros locais significantes onde a fonte de gás provavelmente estará presente.

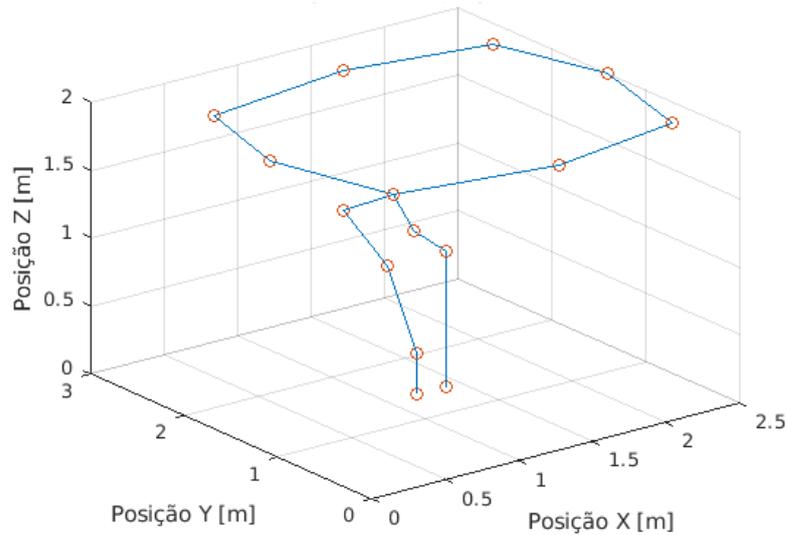
(2) Mesmo que a posição real da fonte esteja distante, um desafio real para abordagens heurísticas suscetíveis a mínimos locais, a cobertura global da área de interesse resultará em uma alta probabilidade de medições positivas. Assim, a estratégia de cobertura global se destaca em verificações diárias.

(3) Por fim, o GDM proporciona uma visão abrangente da área de interesse e a capacidade de lidar com múltiplas fontes. Isso aprimora a busca e confirma a possibilidade de presença de mais de uma fonte, consolidando a eficácia do método.

Na teoria, a reconstrução ideal do GDM demandaria uma trajetória do VANT que abrangesse todo o ambiente com velocidade reduzida. No entanto, as limitações de energia inerentes aos nanoquadricópteros e considerações práticas tornam o tempo de voo um fator restritivo na escolha da trajetória mais adequada. Nesse contexto, para este experimento, foi adotada uma rota predefinida que percorre todos os vértices da área de teste, simulando um sobrevoo sobre uma área de interesse.

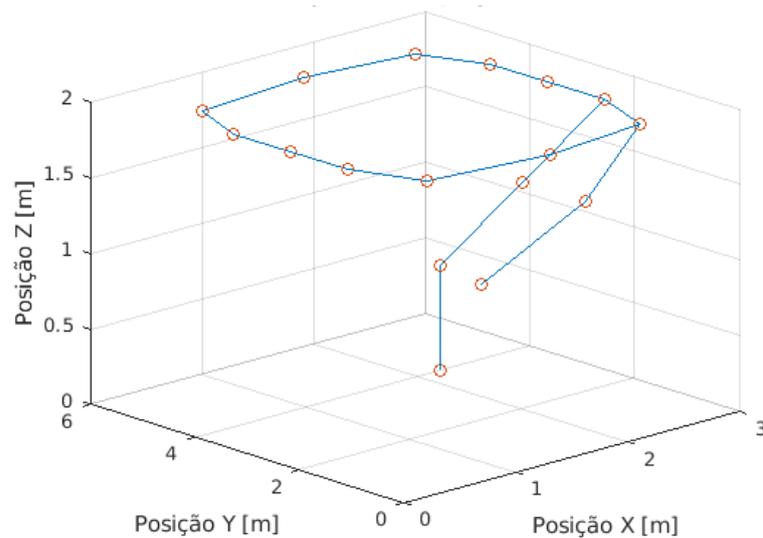
No primeiro cenário, os testes foram conduzidos dentro do perímetro de 2,7m x 2,7m [x, y]. Já no segundo cenário, as dimensões de mapeamento foram ampliadas para cobrir o perímetro de 5,1m x 2,7m [x, y]. As trajetórias planejadas estão exemplificadas nas Figuras 4.3 e 4.4, onde os círculos vermelhos indicam as posições transmitidas ao CF2, enquanto a rota planejada está destacada em azul.

Figura 4.3 Trajetória para Cenário 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.4 Trajetória para Cenário 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

É relevante destacar que esta abordagem viabiliza uma cobertura sistemática e abrangente da área de interesse, assegurando que a trajetória selecionada seja adaptada às limitações energéticas do nanoquadricóptero, proporcionando simultaneamente dados substanciais para a construção do mapa de distribuição de gás. O CF2 foi programado para seguir as trajetórias projetadas a uma velocidade média de 0,25 m/s, demandando aproximadamente 4 segundos para concluir cada alteração de posição.

No primeiro cenário, foram conduzidos testes com uma fonte de odor, posicionada em duas localidades distintas, segregadas nos experimentos 1 e 2. No segundo cenário, ampliou-se o perímetro, conduzindo um conjunto de testes com duas fontes de odor posicionadas em direções opostas dos vértices, visando facilitar a visualização dos resultados e minimizar o impacto do tempo de recuperação do sensor de gás nas análises dos dados obtidos. Este delineamento experimental proporciona uma avaliação abrangente das capacidades do sistema diante de diferentes configurações e condições. Os resultados e observações sobre os referidos testes serão apresentados no capítulo subsequente.

4.5 *Software*

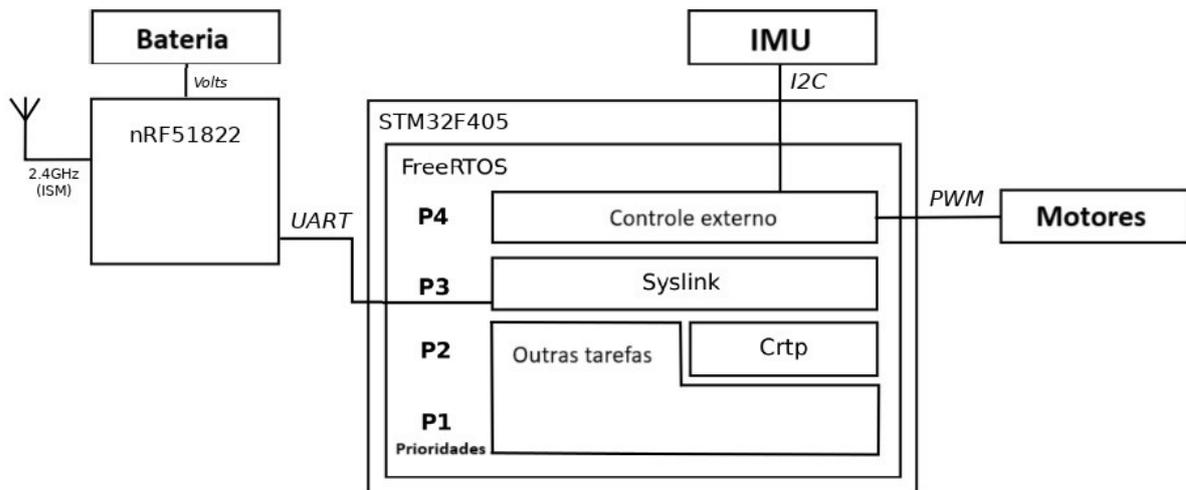
4.5.1 *Firmware*

O *firmware* do CF2 é baseado no FreeRTOS (*Free Real-Time Operating System*), um sistema operacional de código aberto em tempo real. O *firmware* atualmente distribuído com o Crazyflie executa uma variedade de tarefas. Os comandos são enviados ao nanoquadricóptero usando o CRTP (*Compressed Real-Time Transport Protocol*) e um controlador interno estabiliza os ângulos de Euler desejados contidos nos comandos. A possibilidade de modificação do *software* está presente tanto no nRF51822 quanto no STM32F405 (Landry, 2015).

O controle da antena é realizado pelo nRF51822, que não processa quaisquer dados de entrada ou saída. Em vez disso, ele os encaminha para o STM32F405 por meio de comunicação serial entre os dois dispositivos. No STM32F405, a *task Syslink* é responsável por transformar o fluxo de dados de entrada em pacotes. Para minimizar a latência no circuito de controle, a *task Syslink* verifica imediatamente se os pacotes contêm dados de entrada de controle (como ângulos de Euler e velocidades angulares desejadas) ou solicitações de sensor. Se contiverem dados de entrada de controle, a tarefa atualiza diretamente a área de memória acessada pela *task Offboardctrl*, que busca os valores dos ângulos de Euler e velocidades angulares desejadas. Na iteração subsequente, a *task Offboardctrl* utiliza esses valores para calcular os comandos do motor utilizando um controlador PD (Proporcional e Derivativo)

simples. Por outro lado, se o pacote recebido for vazio e estiver destinado ao canal de sensor, ou seja, uma solicitação de sensor, a *task Syslink* lê diretamente a área de memória onde a *task Offboardctrl* armazena as últimas medições da Unidade de Medição Inercial (IMU), cria um pacote e o envia de volta através da comunicação UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) (Landry, 2015). A Figura 4.5 apresenta uma visão geral da arquitetura do *firmware*.

Figura 4.5 Visão geral da arquitetura do *firmware*.



Fonte: Adaptado de Landry (2015).

O processo adotado nessa Tese segue o esquema de comunicação original, colocando o pacote na fila de entrega da *task* CRTP para posterior despacho à tarefa correspondente. A priorização de pacotes relacionados a sensores e entradas de atuadores é implementada para evitar o congestionamento das filas de *firmware*. Além disso, sempre há prioridade aos sinais de controle mais recentes, descartando os antigos, se necessário, antes de passarem pelo controlador ou pelos atuadores.

Para viabilizar a comunicação entre o sensor SGP40 e o CF2, foram efetuadas modificações no *firmware* da aeronave. Para fins experimentais, apenas o *firmware* do microcontrolador principal (STM32F405) sofreu alterações. O *firmware* foi ajustado para agregar uma tarefa específica: transmitir, via rádio, as leituras do sensor SGP40 embarcado no CF2 para a estação base.

O primeiro passo foi estabelecer o ambiente de desenvolvimento e acessar o código-fonte do *firmware*, clonando os repositórios relevantes do *GitHub*.

Para efetuar essa implementação, o fabricante sugere a adoção de dois procedimentos específicos: o *Deck API* e o *App Layer*.

O segundo procedimento é a Camada de Aplicação (*App Layer*). A Camada de Aplicação é um conjunto de funcionalidades e APIs que permitem ao usuário adicionar código personalizado ao Crazyflie. Ao compilar o Crazyflie com `CONFIG_APP_ENABLE=y`, o *firmware* chama a função '`void appMain()`' após a conclusão da sequência de inicialização. Para maior controle, é possível definir a função '`void appInit()`', que será chamada durante a inicialização sem criar uma tarefa, e, portanto, '`appMain()`' não será chamada automaticamente. Esta função deve retornar para permitir que a sequência de inicialização continue.

Os passos em cada etapa de adequação do *firmware* foram discutidos e resumidos. Para obter informações mais aprofundadas, é recomendado consultar a referência Bitcraze (2023), onde todos os passos estão mais detalhados.

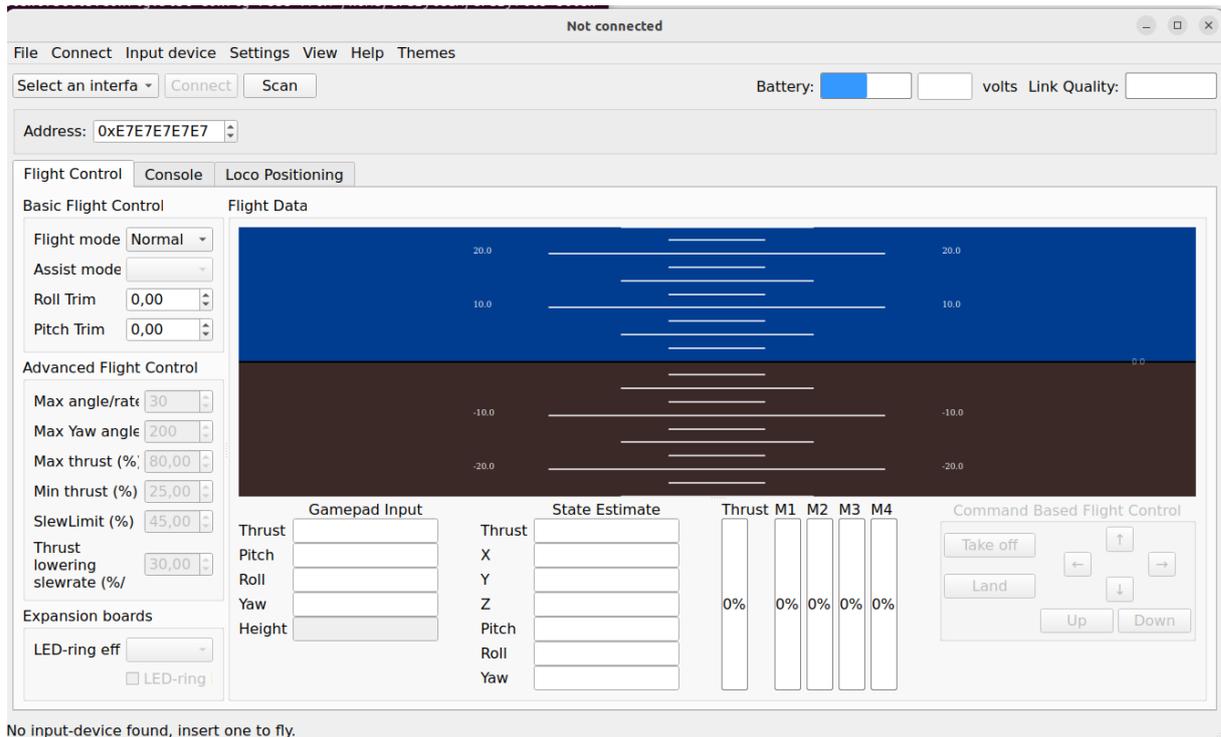
4.5.2 Crazyflie Java Client

O *software* padrão do Crazyflie (*Crazyflie Python Client* – CPC) é desenvolvido em Python. Alternativas compatíveis com os sistemas operacionais Linux, Mac OS e Windows, escritas em Ruby, C, C++, C#, JavaScript e Java, estão disponíveis no serviço de hospedagem GitHub (Bitcraze GitHub, 2024). O aplicativo *Crazyflie Java Client* (CJC) foi criado com base no *software* e na biblioteca CPC, com o objetivo de oferecer uma alternativa simplificada e predefinida para a comunidade científica e estudantes (Giernacki *et al.*, 2017).

A funcionalidade do *software* é projetada para facilitar sua utilização como registrador de dados em projetos de pesquisa e educacionais, como o desenvolvimento de estimadores de vetores de estado e a identificação de parâmetros de modelos de VANT. O *software* permite a fusão de dados dos sensores e a análise da dinâmica do CF2. Durante o modo de voo, é possível monitorar as variações nas velocidades das unidades de propulsão durante manobras e o nível de carga da bateria.

O CJC possui dois objetivos principais: fornecer uma visualização preliminar dos parâmetros básicos de voo, conforme ilustrado na Figura 4.5, e arquivar todos os dados disponíveis do CF2, especialmente os provenientes de sensores integrados.

Figura 4.5 Interface CJC.



Fonte: Adaptado de Bitcraze (2023).

O CJC está disponível como um *software* de código aberto, entre outros, no banco de dados MMD (*Mathematical Models Database*), onde suas capacidades são amplamente demonstradas (Giernacki *et al.*, 2016). O uso da linguagem Java em conjunto com o Apache Maven e o Java FX permitiu a criação de um *software* para múltiplas plataformas e sistemas operacionais. O *software* permite gravar dados de voos, com até 6 parâmetros diferentes simultaneamente, diretamente em um arquivo .csv ou em um dos dois bancos de dados: MySQL (My Structured Query Language) e MongoDB (Giernacki *et al.*, 2017).

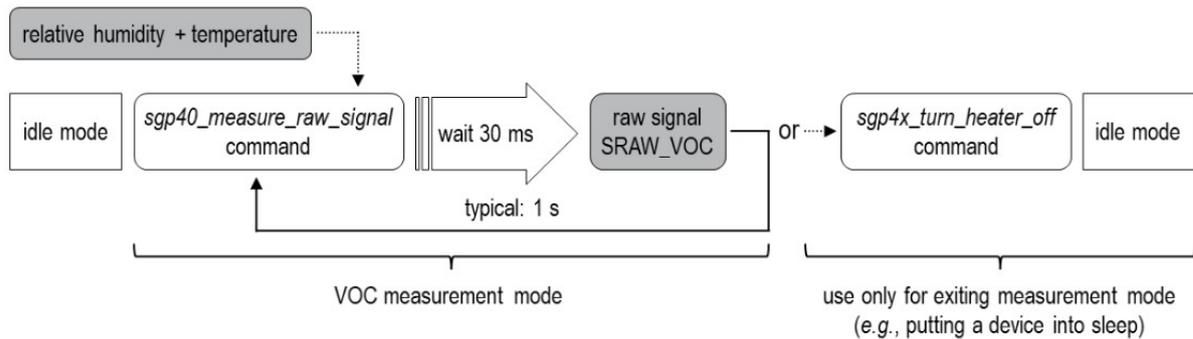
4.5.3 Diretrizes de comunicação para leitura de sinal bruto

O chip SGP40 proporciona um sinal digital bruto (SRAW_VOC) que demonstra sensibilidade à maioria dos gases VOC comumente encontrados em ambientes internos. O código foi desenvolvido para adquirir essa medida a uma taxa de frequência de 1 Hz.

O cabeçalho, usado na comunicação I2C, é composto pelo endereço do sensor seguido por um bit que indica se a operação é de leitura ou escrita. O endereço I2C atribuído ao sensor é 89 em formato decimal (ou 0x59 em formato hexadecimal) (Sensirion, 2023).

A Figura 4.6 apresenta o fluxo de processos para realizar uma medição de sinal bruto com o SGP40.

Figura 4.6 Fluxo de processos para medição de sinal bruto do sensor SGP40.



Fonte: Sensirion (2023).

A execução do comando `'sgp40_measure_raw_signal'` é responsável por iniciar ou manter o modo de medição de VOC. Esse comando inicia a medição do sinal bruto (SRAW_VOC), que é disponibilizado após um intervalo de 30 ms. O valor do sinal bruto, expresso em “ticks”, é transmitido como uma palavra de 16 bits seguida por um byte CRC. Esse valor em “ticks” é diretamente proporcional ao logaritmo da resistência do sensor. As medições são realizadas a cada segundo, sendo necessário chamar o comando `'sgp40_measure_raw_signal'` repetidamente a cada segundo, sem interromper o aquecimento do sensor. Para encerrar o modo de medição de VOC, o mestre deve executar o comando `'sgp4x_turn_heater_off'`, desligando a placa e colocando o sensor em modo inativo (Sensirion, 2023).

O SGP40 possui uma funcionalidade de compensação automática de umidade integrada ao chip do sinal bruto. Inicialmente, essa característica permanece desativada, a menos que os valores padrão de umidade e temperatura sejam enviados junto com o comando `'sgp40_measure_raw_signal'`. Para ativar a compensação, o comando de medição deve incluir duas palavras (juntamente com seus respectivos bytes CRC), onde a primeira palavra representa a umidade relativa e a segunda palavra representa a temperatura. Assim, para ativar a compensação de umidade no chip, os valores atuais de umidade relativa e temperatura devem ser fornecidos como parte do comando de medição (Sensirion, 2023).

4.5.4 Interface Python

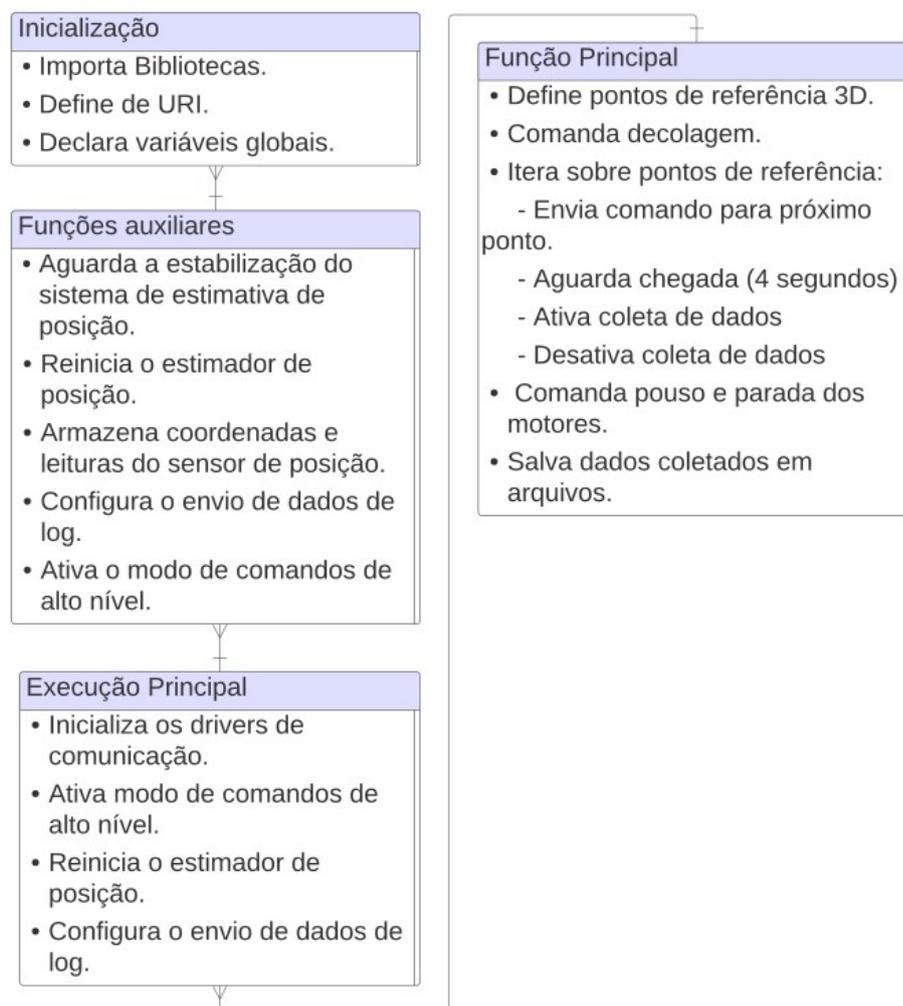
A comunicação da aeronave com o computador ocorre por meio de programas escritos em Python. A Bitcraze disponibiliza uma biblioteca que permite aos usuários desenvolverem os seus próprios aplicativos clientes. Essa biblioteca oferece chamadas simples para o rádio

USB que podem ser enviadas para o Crazyflie, além de permitir ao usuário definir retornos de chamada para dados recebidos do nanoquadricóptero. De modo geral, através dessa biblioteca é possível enviar *setpoints*, receber os dados advindos do sistema de sensoriamento, bem como alterar parâmetros diversos no *firmware*. Dessa forma, para essa Tese, foi desenvolvido um programa em Python capaz de integrar as funcionalidades do CJC com o aplicativo de trajetória e armazenamento de dados.

O algoritmo proposto adota a abordagem de mapeamento da distribuição de gás, em vez da busca ativa pela fonte. Para isso, é aplicada uma trajetória predeterminada, conforme demonstrado na seção 4.4, para cobrir uma área específica de interesse.

O diagrama em blocos, visto na Figura 4.7, representa a estrutura lógica e a sequência de operações do programa desenvolvido. Este programa é projetado para permitir que o VANT execute uma trajetória predefinida enquanto coleta dados do sensor de gás SGP40.

Figura 4.7 Diagrama em blocos das etapas principais do código de voo.



Fonte: Elaborado pela autora.

A etapa de inicialização do programa abrange várias ações essenciais para a preparação do controle do Crazyflie 2.1. Primeiramente, são importadas todas as bibliotecas necessárias para a comunicação com o drone e manipulação de dados. Em seguida, define-se o URI (*Uniform Resource Identifier*), que especifica o endereço de comunicação com o Crazyflie, ajustado conforme o drone utilizado. Por fim, são declaradas variáveis globais destinadas ao armazenamento dos dados de voo e das leituras do sensor de gás durante a operação.

As funções auxiliares servem de suporte para a execução principal do programa, garantindo a correta inicialização e operação do drone. Primeiramente, uma função aguarda até que o sistema de estimativa de posição do Crazyflie esteja estável, utilizando dados do filtro de Kalman. Outra função reinicia o estimador de posição, assegurando a precisão da localização. Além disso, uma rotina armazena as coordenadas de posição e as leituras do sensor de gás em vetores, sempre que novos dados de log são recebidos do drone. Outra função configura o Crazyflie para enviar periodicamente dados de log contendo as coordenadas de posição e as leituras do sensor de gás. Por fim, uma função ativa o modo de comandos de alto nível no Crazyflie, permitindo o uso de comandos avançados como decolar, pousar e ir para pontos específicos.

A execução principal do programa é responsável pela configuração inicial e pela manutenção da comunicação com o Crazyflie, preparando o ambiente para a sequência de voo. Inicializa-se os drivers necessários para a comunicação com o drone e estabelece-se uma conexão segura e estável com o Crazyflie. Em seguida, habilita-se o uso de comandos avançados no drone. A precisão do estimador de posição é assegurada antes do início do voo, reiniciando-o. Finalmente, o sistema é preparado para receber e registrar dados de log do drone, incluindo coordenadas e leituras do sensor, garantindo que todas as informações necessárias sejam coletadas durante o voo.

A função principal do programa é responsável pela implementação da lógica de voo e coleta de dados. Inicialmente, define-se a trajetória que o drone seguirá, estabelecendo uma série de pontos de referência tridimensionais que formam a trajetória desejada. O voo começa com a decolagem do drone até uma altura de 1 metro. Em seguida, o drone se move sequencialmente entre os pontos de referência pré-definidos. Para cada mudança de posição, o drone consome, em média, tempo de 4 segundos para se deslocar até o próximo ponto. Durante este processo, a coleta de dados do sensor de gás é ativada e desativada conforme necessário para obter leituras sincronizadas com as coordenadas de posição. Após completar a

trajetória, o drone recebe o comando para pousar e desligar os motores. Os dados coletados durante o voo, incluindo as coordenadas de posição e as leituras do sensor de gás, são então armazenados em arquivos de texto. Esta etapa integra a navegação do drone com a funcionalidade de coleta de dados, garantindo que todas as informações necessárias sejam capturadas de maneira confiável e organizada.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O escopo da pesquisa concentra-se na análise da relação entre os dados obtidos pelo sensor de gás durante o voo e a identificação da posição da fonte do vazamento de gás. O objetivo dos testes em todos os cenários e posições é verificar se a variação da concentração de gás percebida pelo sensor embarcado no nanoquadricóptero pode ser usada com boa precisão para identificar possíveis vazamentos de gases VOC em ambientes fechados e sem fluxo de ar. Com o propósito de alcançar esse objetivo, foram conduzidos uma série de experimentos que compreenderam: o mapeamento da dispersão do vapor de álcool etílico absoluto em todo o ambiente, a verificação da correlação dos dados das leituras com as localizações das fontes e a análise estatística dos erros de posição.

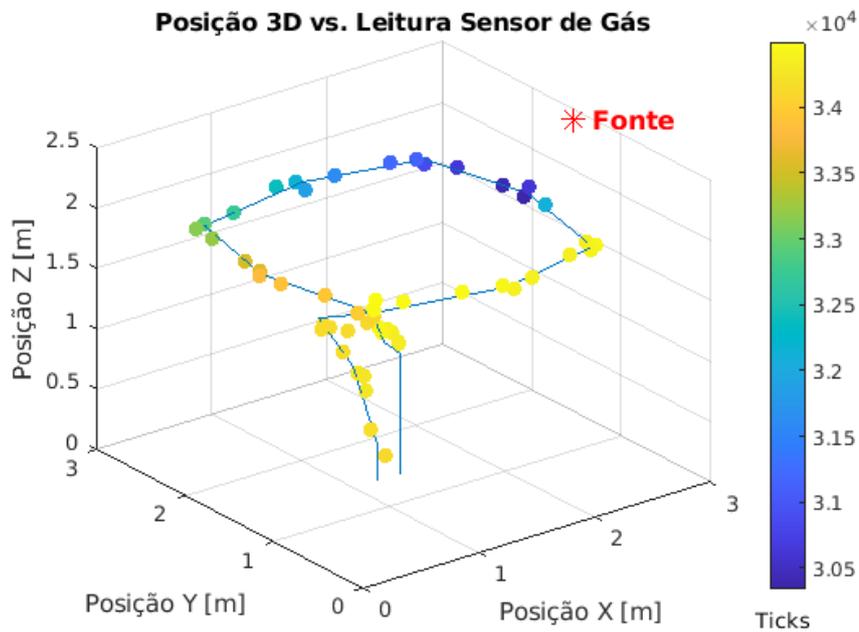
Neste capítulo, os resultados e análises dos ensaios de mapeamento da fonte de odor serão apresentados por cenários. No cenário 1, foram conduzidos dois conjuntos de testes, cada um com a fonte de odor posicionada em pontos distintos. Por outro lado, no cenário 2, realizou-se um único conjunto de testes, envolvendo a inserção de duas fontes de odor simultaneamente.

5.1 Cenário 1 - Mapeamento com uma fonte de odor

Dois experimentos foram conduzidos nesse cenário: o primeiro, com a fonte de odor situada em um ponto lateral da trajetória de voo, e o segundo, com a fonte posicionada no centro.

Iniciando com o cenário 1, no qual a fonte foi posicionada em uma das laterais da trajetória, a Figura 5.1 exemplifica os valores registrados pelo sensor de gás ao longo da trajetória em relação às posições do CF2 no primeiro ensaio do experimento 1. Nessa configuração, a fonte de odor foi alocada em (2,90; 1,40; 2,50) [x y z].

Figura 5.1 Posição 3D vs. Leitura do sensor para Cenário 1 (a).



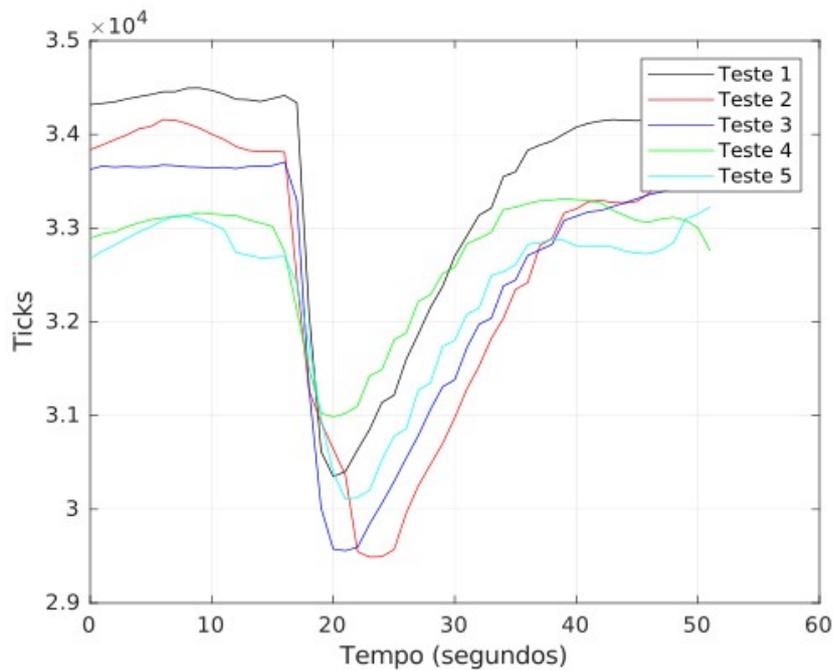
Fonte: Elaborado pela autora.

É possível extrair informações cruciais da Figura 5.1. Vale destacar que o valor informado pelo sensor segue uma relação inversamente proporcional, assim, valores mais baixos de "ticks" indicam concentrações mais elevadas de etanol. Portanto, no gráfico ilustrado na Figura 5.1, as tonalidades mais próximas do azul escuro denotam níveis mais elevados de concentração de VOC.

Uma elevada densidade de pontos na tonalidade azul escuro ao longo dos pontos da trajetória mais próximos à fonte de odor indica que o sensor é capaz de discernir uma significativa disparidade na concentração dos Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) nessa região específica. Um detalhe adicional a ser notado é a transição gradual da tonalidade, à medida que o sensor passa pelo processo de 'recuperação', retornando a valores próximos, porém ligeiramente superiores, aos registros anteriores à detecção. Esse comportamento é conforme o esperado e foi cuidadosamente abordado na seção 4.2, na qual as características do sensor foram analisadas de maneira detalhada.

A cada teste realizado, os dados provenientes do sensor de gás e as coordenadas de localização do CF2 foram devidamente documentados em arquivos de texto. Para cada experimento foram realizados cinco testes distintos. A Figura 5.2 apresenta os valores obtidos em cada um deles.

Figura 5.2 Leitura do sensor de gás para conjunto de experimentos no Cenário 1 (a).



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 5.2, nota-se que os momentos de descida abrupta no sinal medido foram muito próximos, indicando uma boa repetibilidade nessas variações, o que se revela de suma importância na análise do sistema de detecção. Embora os testes tenham sido conduzidos em condições idênticas e o método de geração de ar misturado ao vapor de álcool tenha permanecido inalterado ao longo do processo, observou-se uma variação na intensidade das leituras. Além disso, há uma ligeira diferença nos valores iniciais de base e no tempo de recuperação, que variou entre 10 e 20 segundos. A partir dessas informações, foi elaborado um algoritmo para identificar com precisão o momento durante o voo em que ocorreu a oscilação máxima na leitura do sensor de gás. Em seguida, a posição identificada foi confrontada com a localização da rota mais próxima da fonte de odor, estabelecida nesse experimento como (2,50, 1,40, 2,00) [x, y, z]. Os resultados dessa comparação estão apresentados na Tabela 5.1.

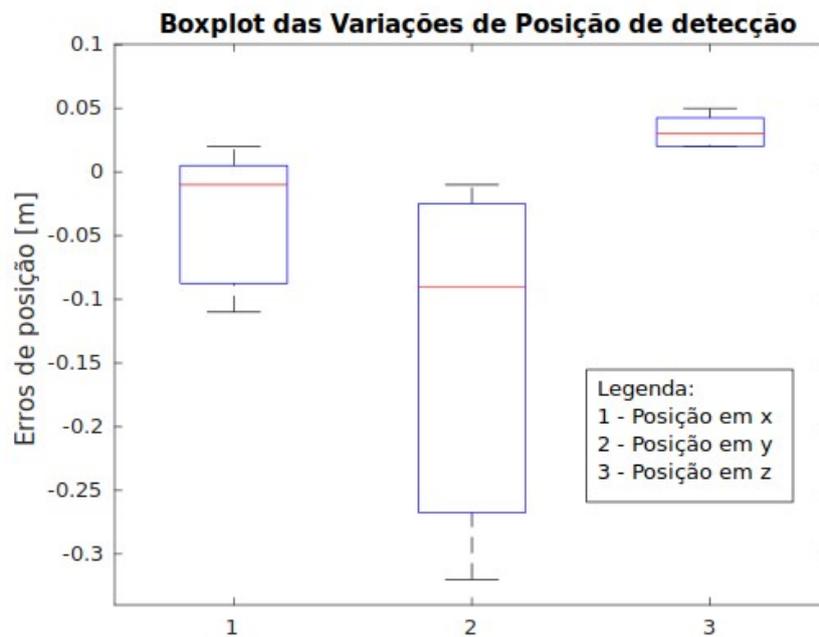
Tabela 5.1. Síntese do Experimento 1 para o Cenário 1.

Ensaio	Posição estimada [m] [x y z]	Erro [m][x y z]
1	[2.42, 1.08, 2.05]	[-0.08,-0.32, 0.05]
2	[2.52, 1.39, 2.02]	[0.02, -0.10, 0.02]
3	[2.39, 1.15, 2.03]	[-0.11, -0.25, 0.03]
4	[2.50, 1.37, 2.02]	[0.00, 0.03, 0.02]
5	[2.49, 1.31, 2.04]	[-0.01, -0.09, 0.04]
Mediana	[2.49, 1.31, 2.03]	[-0.01, -0.09, 0.03]

Fonte: Elaborado pela autora.

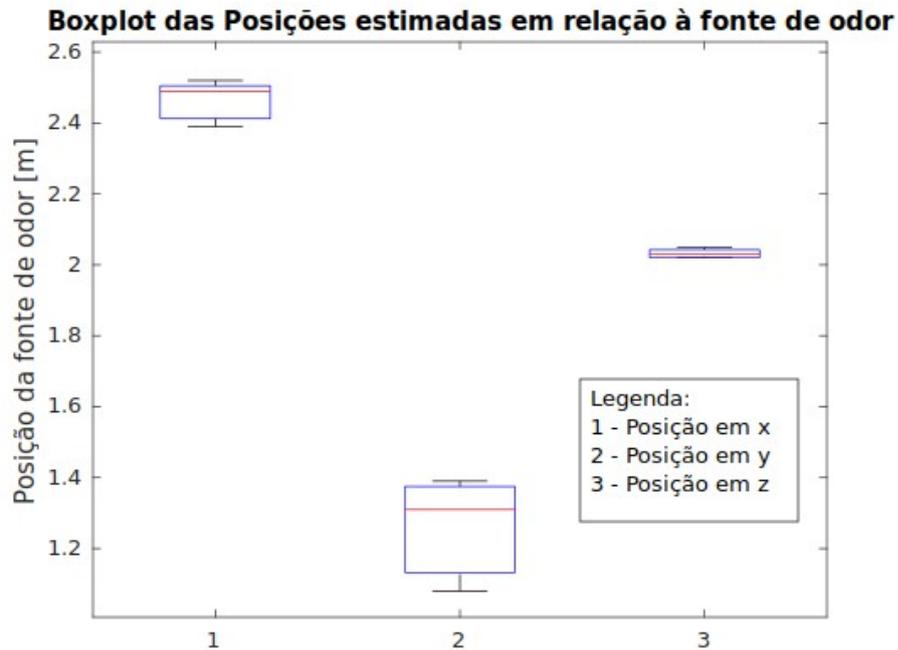
A fim de facilitar a análise estatística e proporcionar uma visualização mais nítida, os dados apresentados na Tabela 5.1 foram consolidados e agrupados por meio de *boxplots*. A Figura 5.3 ilustra o *boxplot* das variações na posição de detecção para todos os experimentos, enquanto a Figura 5.4 exibe o *boxplot* para a posição estimada da fonte de odor.

Figura 5.3 *Boxplot* de erros de posição para Cenário 1 (a).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 5.4 *Boxplot* de desvios em relação à posição estimada da fonte para Cenário 1 (a).

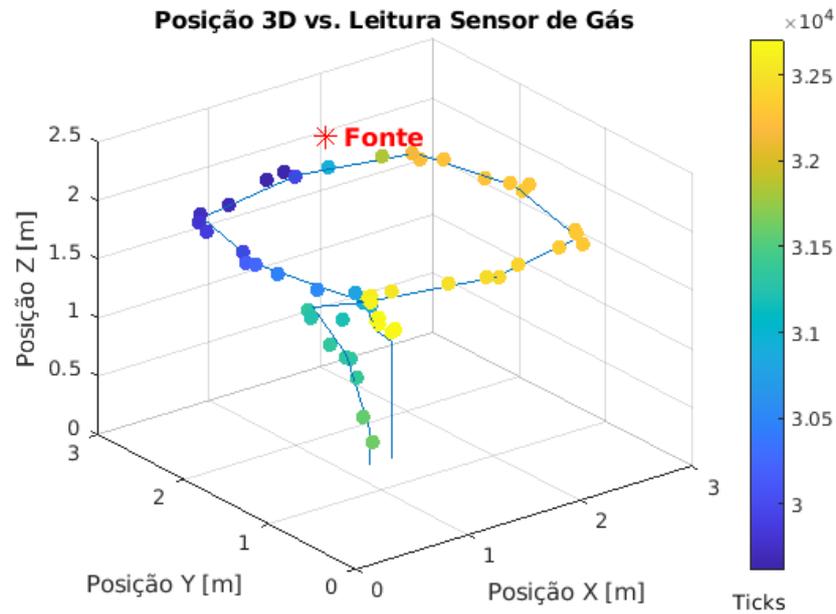


Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 5.3, o *boxplot* destaca a dispersão e a tendência central dos dados referentes aos erros de detecção, proporcionando uma visão clara da variabilidade nos sinais coletados pelo sensor de gás. De forma semelhante, o *boxplot* da Figura 5.4, apresenta a dispersão e a tendência central dos dados referentes à posição estimada da fonte de odor. Em ambas as figuras, as caixas centrais destacam o intervalo interquartil, ou seja, a região que concentra a maior parte dos dados. As linhas dentro das caixas indicam as medianas, que são os valores centrais da distribuição.

No mesmo cenário do primeiro experimento e efetuando a mesma trajetória, realizou-se um segundo, desta vez com a fonte de odor posicionada na região central da trajetória, em (1,35; 2,10; 2,50) [x, y, z]. Os resultados da leitura tridimensional do sensor de gás para o primeiro teste realizado no experimento 2 são apresentados na Figura 5.5.

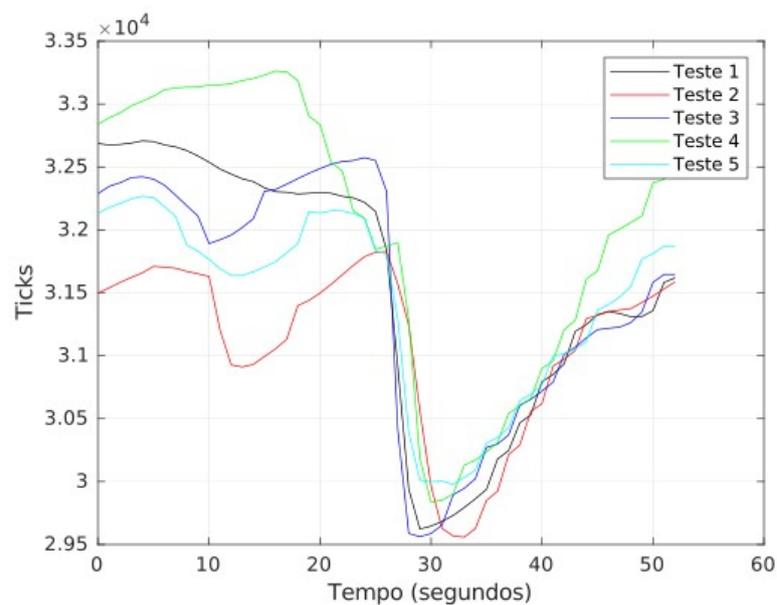
Figura 5.5 Posição 3D vs. Leitura do sensor para Cenário 1 (b).



Fonte: Elaborado pela autora.

Da mesma forma, após a execução dos experimentos, os dados provenientes do sensor e as coordenadas foram gravados em arquivos de texto e organizados para serem analisados. A Figura 5.6 apresenta de forma gráfica os cinco testes realizados no experimento 2.

Figura 5.6 Leitura do sensor de gás para conjunto de experimentos no Cenário 1 (b).



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 5.6, embora o sinal medido tenha apresentado variações nos primeiros 20 segundos dos ensaios, a partir da variação abrupta ocorrida entre os 27 e 28 segundos de voo, os sinais demonstraram comportamentos semelhantes em relação à intensidade e ao tempo de recuperação, quando comparados ao experimento 1. As oscilações iniciais, nos primeiros segundos, são atribuídas à sensibilização do sensor pelo gás, mesmo que em baixíssima intensidade, considerando que a fonte estava localizada a uma distância de aproximadamente um metro naquela parte do trajeto.

Com base nessas informações, foi utilizado novamente o algoritmo capaz de identificar o instante em que ocorreu a oscilação máxima na leitura do sensor de gás durante o voo. A Tabela 5.2 apresenta as posições e o erro, que é definido como a diferença entre a posição do ponto de rota mais próximo da posição de origem real (1,40, 2,50, 2,00) [x, y, z] e a posição no momento de detecção.

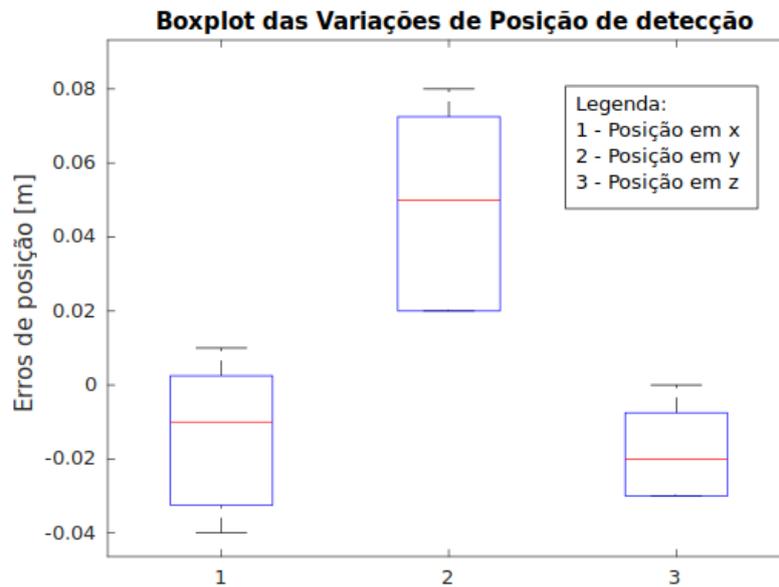
Tabela 5.2. Síntese do Experimento 2 em Cenário 1 (a).

Ensaio	Posição estimada [m] [x y z]	Erro [m][x y z]
1	[1.39, 2.52, 1.97]	[-0.01, 0.02, -0.03]
2	[1.36, 2.58, 2.00]	[-0.04, 0.08, 0.00]
3	[1.41, 2.52, 1.98]	[0.01, 0.20, -0.02]
4	[1.40, 2.57, 1.97]	[0.00, 0.07, -0.03]
5	[1.37, 2.55, 1.99]	[-0.03, 0.05, -0.01]
Mediana	[1.39, 2.55, 1.98]	[-0.01, 0.05, -0.02]

Fonte: Elaborado pela autora.

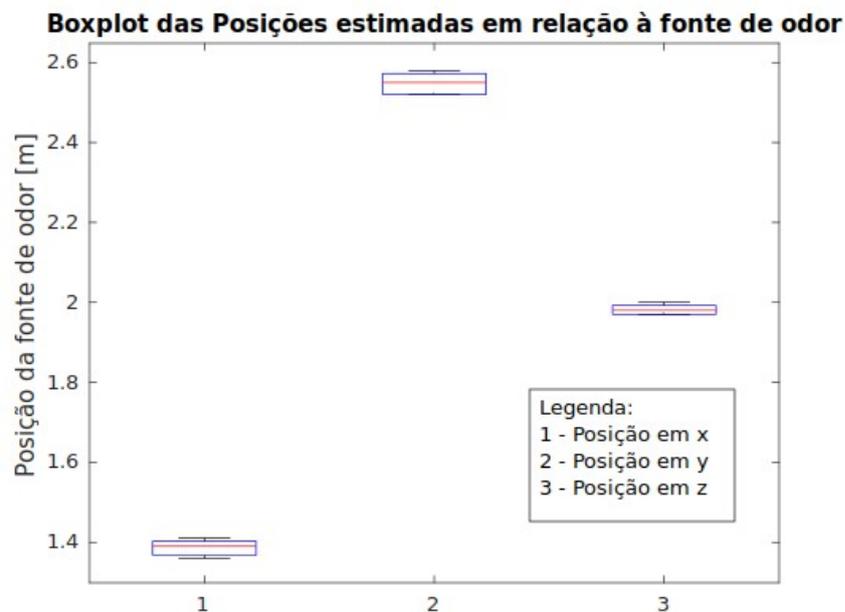
Consistente com a abordagem anterior, os dados foram consolidados e agrupados por meio de *boxplots*. A Figura 5.7 ilustra o *boxplot* das variações na posição de detecção para todos os experimentos, enquanto a Figura 5.8 exibe o *boxplot* para a posição estimada da fonte de odor para o experimento 2 do cenário 1.

Figura 5.7 *Boxplot* de erros de posição para Cenário 1 (b).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 5.8 *Boxplot* de desvios em relação à posição estimada da fonte para Cenário 1 (b).



Fonte: Elaborado pela autora.

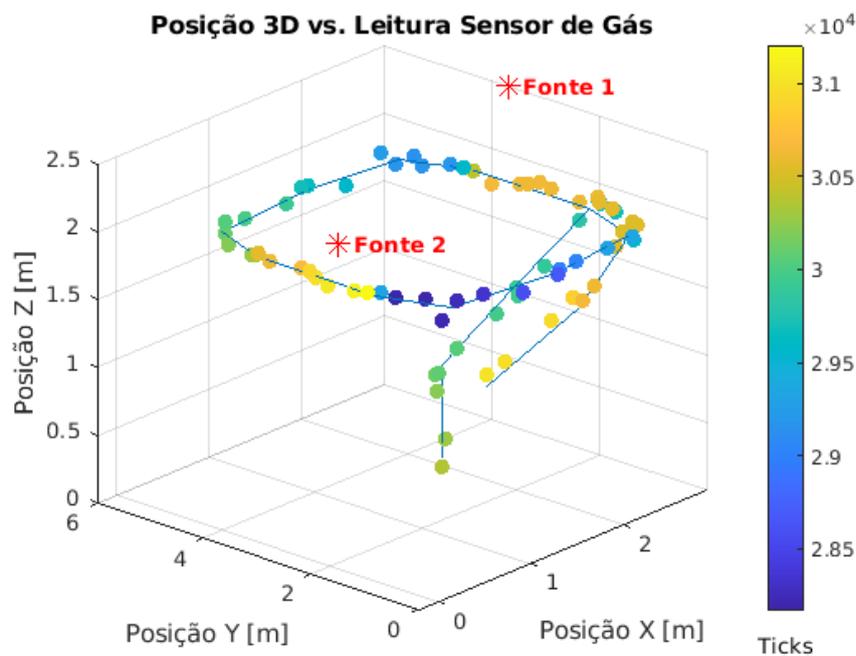
Embora os ensaios dos experimentos 1 e 2 tenham sido conduzidos no mesmo cenário, sob as mesmas condições de trajetória e concentração de VOC, os resultados apresentaram uma leve diferença. No experimento 1, o maior erro ocorreu na posição y, com uma Mediana

de 0,09 metros, enquanto no experimento 2, o resultado foi ligeiramente mais satisfatório, com uma mediana de 0,05 metros. Observou-se, ainda, que os dados do experimento 2 exibiram uma menor variabilidade. Entretanto, dada a magnitude e o tamanho do ambiente analisado, essas diferenças podem ser consideradas estatisticamente pouco significativas.

5.2 Cenário 2 – Mapeamento de área ampliada com duas fontes de odor

No segundo cenário a área foi ampliada para favorecer a inclusão de uma fonte extra de odor, guardando uma distância razoável entre elas para facilitar a análise e possibilitar a recuperação do sensor para novas detecções. A Figura 5.9 exibe os resultados do teste 1 com as fontes de odor posicionadas em (2,90; 3,70; 2,50) e (-0,2; 1,50; 2,50) [x y z].

Figura 5.9 Posição 3D vs. Leitura do sensor para Cenário 2.



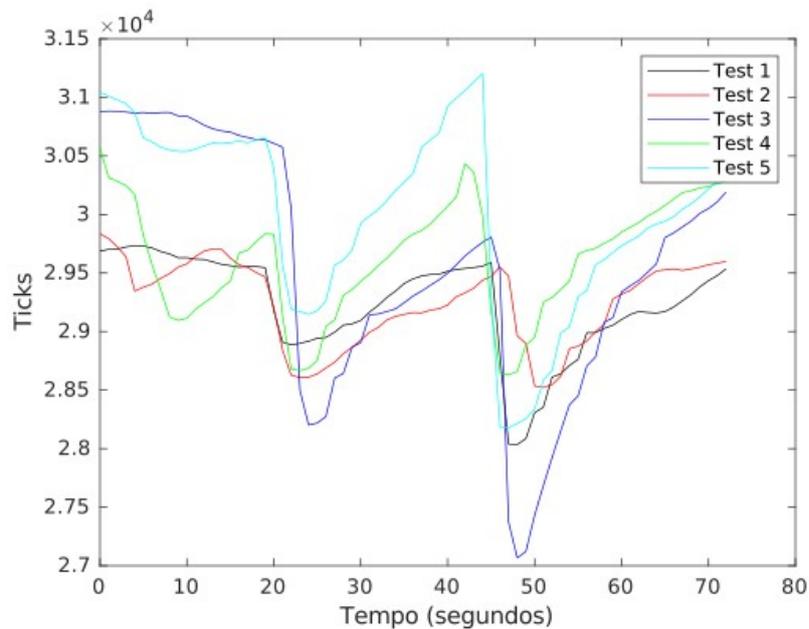
Fonte: Elaborado pela autora.

A trajetória seguiu no sentido anti-horário, percorrendo inicialmente a área próxima à fonte 1 e, em seguida, dirigindo-se à fonte 2. Observa-se uma alteração na tonalidade das esferas, que mudam para tons azuis nas proximidades das fontes, retornando gradualmente às tonalidades iniciais conforme se afastam.

De maneira análoga ao procedimento adotado no cenário 1, após a conclusão dos experimentos, os dados oriundos do sensor e as respectivas coordenadas foram registrados em

arquivos de texto. Os resultados gráficos de cinco experimentos conduzidos no cenário 2 estão apresentados de forma visual na Figura 5.10.

Figura 5.10 Leitura do sensor de gás para conjunto de experimentos no Cenário 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

Agrupando os dados obtidos em tabelas para sintetizar as informações e favorecer a análise dos dados, obtemos as tabelas 5.3 e 5.4 para as posições da fonte 1 e fonte 2, respectivamente. A Tabela 5.3 fornece as posições e o erro, que é definido como a diferença entre a posição do ponto de rota mais próximo da posição de origem real (2,50, 3,70, 2,00) [x, y, z] e a posição no momento de detecção.

Tabela 5.3. Síntese de dados em relação à Fonte de odor 1 em Cenário 2.

Ensaio	Posição estimada [m] [x y z]	Erro [m][x y z]
1	[2.52, 3.60, 2.08]	[0.02, -0.10, 0.08]
2	[2.52, 3.66, 2.03]	[0.02, -0.04, 0.03]
3	[2.58, 4.39, 1.92]	[0.08, 0.69, -0.08]
4	[2.52, 3.63, 1.99]	[0.02, -0.07, 0.01]
5	[2.43, 3.72, 2.03]	[-0.07, 0.02, 0.03]
Mediana	[2.52, 3.66, 2.03]	[0.02, -0.04, 0.03]

Fonte: Elaborado pela autora.

Já a Tabela 5.4 fornece as posições e o erro, que é definido como a diferença entre a posição do ponto de rota mais próximo da posição de origem real (0.20,1.50,2.00) [x, y, z] e a posição no momento de detecção.

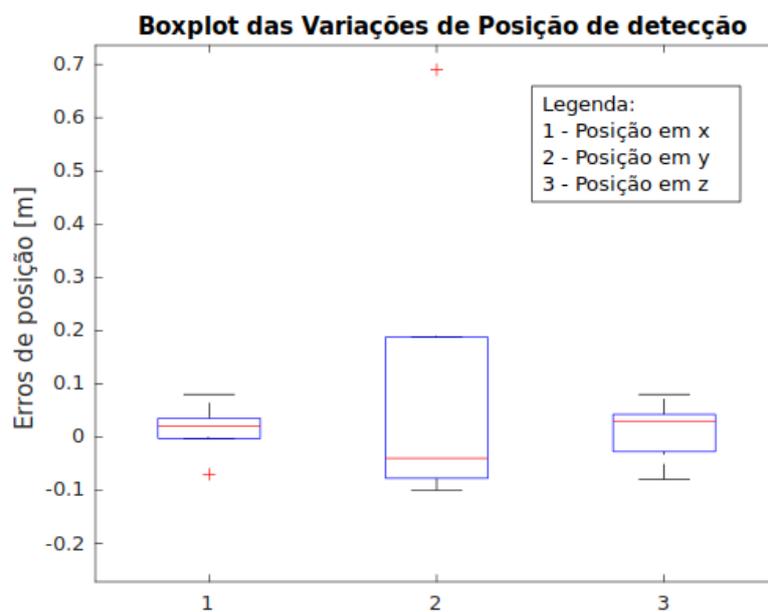
Tabela 5.4. Síntese de dados em relação à Fonte de odor 2 em Cenário 2.

Ensaio	Posição estimada [m] [x y z]	Erro [m][x y z]
1	[0.23, 1.22, 2.00]	[0.03, -0.28, 0]
2	[0.34, 0.82, 2.02]	[0.14, -0.68, 0.02]
3	[0.31, 0.79, 2.02]	[0.11, -0.71, 0.02]
4	[0.20, 1.53, 2.01]	[0.00, 0.03, 0.01]
5	[0.24, 1.47, 2.02]	[0.04, -0.03, 0.02]
Mediana	[0.24, 1.22, 2.02]	[0.04, -0.28, 0.02]

Fonte: Elaborado pela autora.

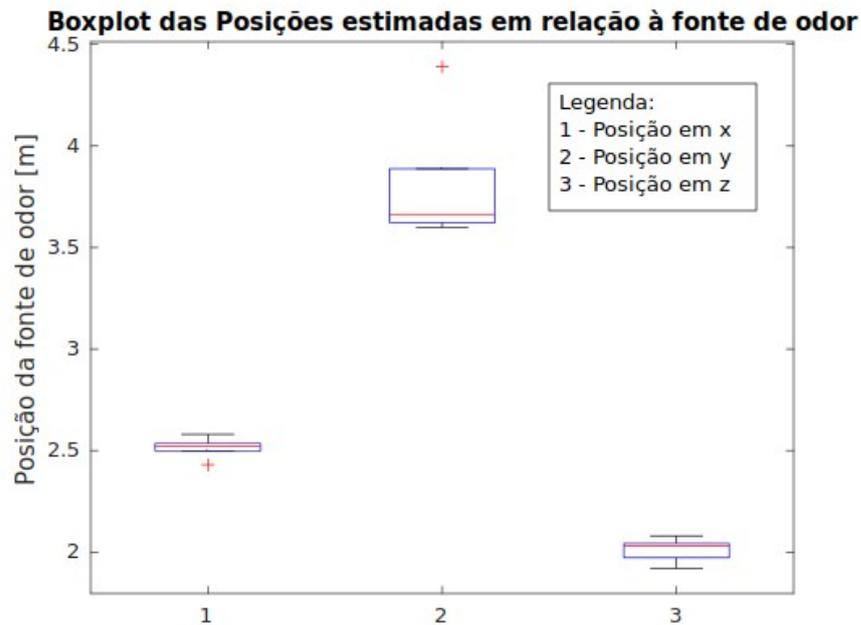
De acordo com a metodologia anterior, os dados foram unificados e organizados usando *boxplots*. A Figura 5.11 apresenta o *boxplot* dos erros relacionados às variações na posição de detecção em relação à fonte de odor 1, ao passo que a Figura 5.12 mostra o *boxplot* para a posição estimada da fonte de odor 1 no cenário 2.

Figura 5.11 *Boxplot* de erros de posição para Cenário 2 – Fonte 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

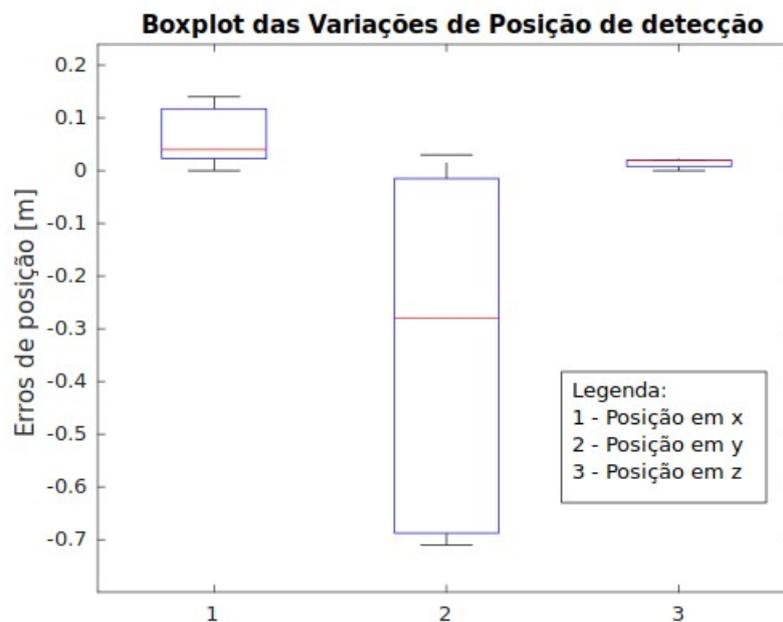
Figura 5.12 *Boxplot* de desvios em relação à posição estimada da fonte no Cenário 2 -Fonte 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

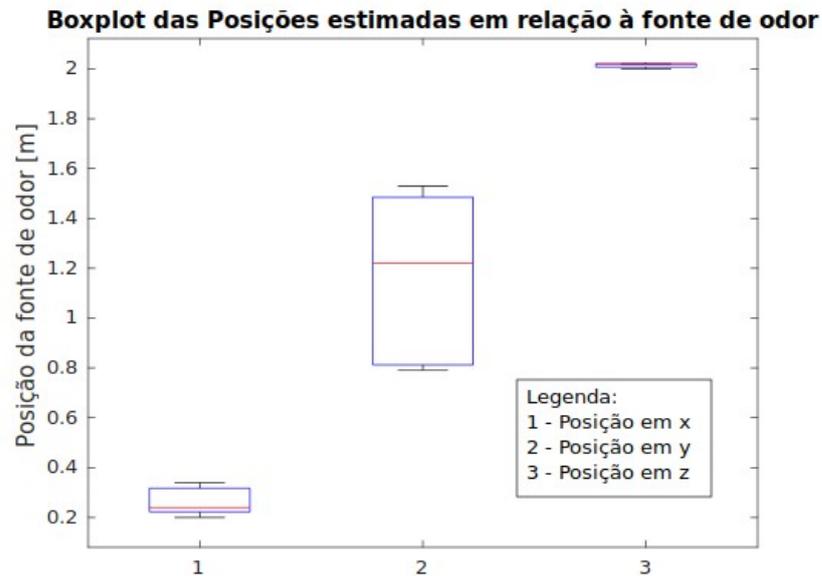
Para a fonte 2 foi aplicada a mesma metodologia. A Figura 5.13 apresenta o *boxplot* dos erros relacionados às variações na posição de detecção em relação à fonte de odor 2, ao passo que a Figura 5.14 mostra o *boxplot* para a posição estimada da fonte de odor 2 no cenário 2.

Figura 5.13 *Boxplot* de erros de posição para Cenário 2 – Fonte 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 5.14 *Boxplot* de desvios em relação à posição estimada da fonte no Cenário 2 -Fonte 2



Na Figura 5.13, o *boxplot* destaca a dispersão e a tendência central dos dados referentes aos erros de detecção, proporcionando uma visão clara de *outliers* e da variabilidade nas observações. Já a Figura 5.14, que apresenta o *boxplot* da posição estimada da fonte de odor, fornece informações cruciais sobre a precisão das estimativas, indicando se estas tendem a se agrupar em torno de um valor central ou se são mais dispersas. Em ambas as figuras, a caixa central representa o intervalo interquartil, ou seja, a região que concentra a maior parte dos dados. A linha dentro da caixa representa a mediana, que é o valor central da distribuição. Os pontos localizados fora dos *whiskers* (linhas que se estendem além da caixa) indicam valores discrepantes, permitindo uma identificação clara dessas ocorrências.

Ao comparar os resultados entre o cenário 1 e o cenário 2, nota-se que, para a detecção da primeira fonte, o sistema apresentou um desvio muito próximo aos ensaios anteriores, com o maior erro ocorrendo na posição y, registrando uma mediana de apenas 0,04 metros. No entanto, em relação à segunda fonte, a precisão foi ligeiramente comprometida, evidenciada por uma mediana mais elevada de 0,28 metros na posição y. A variação maior na direção da coordenada y se deve às características da trajetória projetada, em que a fonte de odor está perpendicular ao deslocamento do drone nessa situação. A disparidade entre os erros obtidos no cenário 1 e 2 é atribuída, em grande parte, à dificuldade do sensor em realizar medições consecutivas com precisão, devido à lenta recuperação do dispositivo.

Os resultados gerais apresentados nesse capítulo destacam que o nanoquadricóptero equipado com o sensor de gás integrado demonstra uma boa capacidade de capturar a pluma de gás, superando desafios como a distribuição não uniforme e a não linearidade das leituras do sensor em relação à distância até a fonte de odor. Apesar do impacto da turbulência gerada pelos rotores no sinal do sensor, foram obtidas com sucesso indicações de posições de detecção muito próximas da fonte de odor em menos de 2 minutos de voo, com medições realizadas durante o deslocamento.

5.3 Limitações do estudo

As evidências obtidas demonstraram consistência com a verdadeira localização da fonte, possibilitando a detecção com erros de localização mínimos. Os resultados sugerem o potencial do uso de um VANT sensível a gás para localizar e mapear fontes de gás em ambientes internos amplos, inclusive a capacidade de detectar múltiplas fontes de odor. No entanto, vale ressaltar que essa capacidade é limitada em casos de fontes de odor muito próximas umas das outras. Essa limitação está relacionada ao tempo prolongado de recuperação dos sensores MOX. Quando um sensor MOX é exposto a duas plumas de gás consecutivas, a resposta ao segundo estímulo ocorre antes que o sensor se recupere totalmente da primeira exposição, de forma que suas medições são influenciadas por detecções anteriores resultando em uma resposta global de menor confiabilidade para estímulos múltiplos.

Uma consideração crucial refere-se à faixa de operação do sensor de gás em relação às condições ambientais. Umidade e temperatura têm grande interferência na qualidade das medições (Boubrima & Knightly, 2021), (Yurko *et al.*, 2019). Observou-se que os sensores MOX frequentemente apresentam uma baixa tolerância a níveis mais elevados de umidade, o que impacta diretamente em seu desempenho. Apesar dessa limitação, é possível mitigá-la de maneira eficaz ajustando a temperatura de operação por meio de *software*, especialmente nos casos em que o programa pode ser alimentado com informações atualizadas sobre temperatura e umidade.

Um fator significativo para esta categoria de sensores está associado à baixa seletividade, ou seja, sua alta sensibilidade a uma ampla variedade de elementos químicos, com limitada capacidade de distingui-los. Portanto, contaminações não intencionais de outros compostos orgânicos voláteis (VOC) podem interferir na identificação precisa do elemento de interesse.

Outra questão importante que restringe a aplicação dessa abordagem está relacionada à dispersão do vapor de gás no ambiente. À medida que a contaminação se propaga, a dinâmica

do gás desempenha um papel fundamental. Se o gás for mais leve que o ar, tem propensão a se acumular na porção superior da sala; no entanto, se for mais denso, tende a concentrar-se na parte inferior. Essa distinção é de suma importância, pois em caso de um vazamento prolongado com difusão significativa, o sistema pode indicar concentrações elevadas em locais distantes da fonte de odor.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Este estudo descreve um sistema aprimorado de detecção de fontes de odores por meio da utilização de um nanoquadricóptero em conjunto com um sensor de gás que se baseia em sensores de óxido de metal (MOX). A proposta central deste sistema é empregar aeronaves de pequenas dimensões para realizar explorações em ambientes internos, com o objetivo de detectar vazamentos de gases voláteis. Essa detecção é realizada por meio da análise da distribuição tridimensional de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) presentes no ambiente, enquanto a aeronave segue uma rota exploratória e transmite on-line as informações de detecção para as estações terrestres. No primeiro cenário, foi considerado um veículo aéreo e uma fonte de geração de gás. Para o segundo cenário, a área de voo foi expandida e foi incluída mais uma fonte de odor. Portanto, as plataformas foram experimentalmente validadas para cobertura interna, detecção e mapeamento de gás, utilizando mais de uma fonte de gás e um VANT de pequeno porte real.

Baseado nos estudos e experimentos apresentados na revisão bibliográfica, pode-se observar que o maior problema relacionado à tarefa de detecção de fonte de odor se encontra na estrutura da pluma de dispersão e na natureza turbulenta do ar influenciada principalmente pelo movimento das hélices. Essa combinação causa um padrão irregular de dispersão, resultando em alterações abruptas tanto no tempo quanto no espaço do sinal de concentração.

A solução apresentada utilizou uma estratégia para identificar fontes de odor, fundamentada no mapeamento tridimensional da distribuição de gases. Nos experimentos, foram utilizados nanoquadricópteros do modelo Crazyflie 2.1 e sensores de gás semicondutor de óxido de metal do modelo SGP40. Por meio desses experimentos, foi possível constatar que o sensor selecionado demonstrou capacidade de identificar a presença de substâncias voláteis na região onde se formou a pluma gerada pelo vapor de álcool etílico. Os resultados indicaram uma mediana do erro na estimativa da localização da fonte de 9 centímetros no primeiro experimento do cenário 1, 5 centímetros no segundo experimento do cenário 1, 4 centímetros na fonte 1 do cenário 2 e 28 centímetros para a fonte 2 do cenário 2. Apesar de uma discrepância entre as medidas para a segunda fonte, causada principalmente pela

característica de lenta recuperação do sensor, essa divergência foi considerada pouco significativa diante das magnitudes analisadas.

O sensor SGP40 apresentou desempenho satisfatório na detecção de vapor de álcool etílico, visto que a implantação de nanoquadricópteros para localização de fonte de gás (GSL) é uma estratégia apropriada para minimizar os riscos e os custos na localização de pequenos vazamentos de VOC em ambientes fechados e sem ventilação. Para outras substâncias, pode ser necessário substituir o sensor para identificação precisa da fonte de odor ou alterar o método de busca pelo ambiente.

Com base nos resultados e nas observações feitas durante esse estudo, algumas direções para pesquisas futuras podem ser exploradas. Uma delas consiste na melhoria da precisão de detecção, por meio de investigações adicionais que visem aprimorar os algoritmos de processamento de dados ou a utilização de sensores mais sensíveis e com recuperação mais rápida. Outra área promissora de pesquisa é a adaptação do sistema para operar em ambientes com obstáculos, o que pode exigir o desenvolvimento de algoritmos de navegação mais robustos e a integração de sensores adicionais, como câmeras ou sensores de proximidade, para evitar colisões.

Além disso, é interessante investigar técnicas para lidar com ambientes altamente ventilados, incluindo o desenvolvimento de estratégias para compensar o efeito da ventilação na dispersão dos gases e na precisão da detecção. A avaliação do desempenho do sistema para detectar e mapear outras substâncias voláteis além do álcool etílico também pode ser conduzida, o que pode exigir a seleção de sensores específicos para cada substância e a adaptação dos algoritmos de processamento de dados conforme necessário.

Outra abordagem que pode ser explorada é a otimização do uso de nanoquadricópteros, incluindo aspectos como a eficiência energética, autonomia de voo e ampliação da quantidade de nanoquadricópteros para realizar voos simultâneos em diferentes altitudes. Isso pode envolver o desenvolvimento de técnicas de controle mais avançadas e a seleção de plataformas de voo mais otimizadas. Essas propostas de trabalhos futuros têm o potencial de ampliar o alcance e a eficácia do sistema proposto, contribuindo para avanços no campo da detecção de vazamentos de gases em ambientes internos.

REFERÊNCIAS

- Al-Okby, M. F. R., Neubert, S., Roddelkopf, T., Fleischer, H., & Thurow, K. (2022). Evaluating of IAQ-Index and TVOC Parameter-Based Sensors for Hazardous Gases Detection and Alarming Systems. *Sensors*, 22(4). <https://doi.org/10.3390/s22041473>
- Al-Okby, M. F. R., Junginger, S., Roddelkopf, T., Huang, J., & Thurow, K. (2024). Ambient Monitoring Portable Sensor Node for Robot-Based Applications. *Sensors*, 24(4). <https://doi.org/10.3390/s24041295>
- Anderson, M. J., Sullivan, J. G., Horiuchi, T. K., Fuller, S. B., & Daniel, T. L. (2020). A bio-hybrid odor-guided autonomous palm-sized air vehicle. *Bioinspiration and Biomimetics*, 16(2). <https://doi.org/10.1088/1748-3190/abbd81>
- Bayat, B., Crasta, N., Crespi, A., Pascoal, A. M., & Ijspeert, A. (2017). Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques. In *Current Opinion in Biotechnology* (Vol. 45). <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.01.009>
- Bitcraze. Crazyflie Start Here. Disponível em: <https://www.bitcraze.io/start>. Acesso em: junho de 2023.
- Bitcraze GitHub. Disponível em: <https://github.com/bitcraze>, access: 6.02.2017. Acesso em: junho de 2023.
- Bouras, A., Gutierrez-Galvez, A., Burgués, J., Bouzid, Y., Pardo, A., Guiatni, M., & Marco, S. (2023). Concentration map reconstruction for gas source location using nano quadcopters: Metal oxide semiconductor sensor implementation and indoor experiments validation. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112638>
- Boon, M. A., Drijfhout, A. P., & Tesfamichael, S. (2017). Comparison of a fixed-wing and multi-rotor UAV for environmental mapping applications: A case study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W6). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-47-2017>
- Boubrima, A., & Knightly, E. W. (2021). Robust Environmental Sensing Using UAVs. *ACM Transactions on Internet of Things*, 2(4). <https://doi.org/10.1145/3464943>
- Brinkmann, T., Both, R., Scalet, B.M., Roudier, S., Sancho, L.D., 2018. JRC reference report on monitoring of emissions to air and water from IED installations; EUR 29261 EN. Eur. IPPC Bur. Eur. Comm. Jt. Res. Cent. <https://doi.org/10.2760/344197>.
- Burgués, J., & Marco, S. (2020). Environmental chemical sensing using small drones: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 748). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141172>

- Burgués, J., Hernández, V., Lilienthal, A. J., & Marco, S. (2019). Smelling nano aerial vehicle for gas source localization and mapping. *Sensors (Switzerland)*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/s19030478>.
- Cabreira, T. M., Brisolara, L. B., & Ferreira Paulo, R. (2019). Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. *Drones*, 3(1). <https://doi.org/10.3390/drones3010004>.
- Chen, X. xing, e Huang, J. (2019). Odor source localization algorithms on mobile robots: A review and future outlook. In *Robotics and Autonomous Systems* (Vol. 112). <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.11.014>.
- Cheng, W. H., & Yuan, C. S. (2022). Identification of Emission Source Using a Micro Sampler Carried by a Drone. *Drones*, 6(5). <https://doi.org/10.3390/drones6050116>
- Collier-Oxandale, A. M., Thorson, J., Halliday, H., Milford, J., & Hannigan, M. (2019). Understanding the ability of low-cost MOx sensors to quantify ambient VOCs. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(3). <https://doi.org/10.5194/amt-12-1441-2019>
- Cova, C. M., Rincón, E., Espinosa, E., Serrano, L., & Zuliani, A. (2022). Paving the Way for a Green Transition in the Design of Sensors and Biosensors for the Detection of Volatile Organic Compounds (VOCs). In *Biosensors* (Vol. 12, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/bios12020051>
- Covington, J. A., Marco, S., Persaud, K. C., Schiffman, S. S., & Nagle, H. T. (2021). Artificial Olfaction in the 21st Century. In *IEEE Sensors Journal* (Vol. 21, Issue 11). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3076412>
- Donarelli, M., & Ottaviano, L. (2018). 2d materials for gas sensing applications: A review on graphene oxide, mos2, ws2 and phosphorene. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 18, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/s18113638>
- Duisterhof, B.; Li, S.; Burgués, J.; Janapa, V. J.; Croon, G (2022). Sniffy bug: a fully autonomous swarm of gas-seeking nano quadcopters in cluttered environments. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636217>.
- Emran, B. J., & Najjaran, H. (2018). Annual Reviews in Control A review of quadrotor: An underactuated mechanical system. *Annual Reviews in Control*, 46, 165–180. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.10.009>
- Epping, R., & Koch, M. (2023). On-Site Detection of Volatile Organic Compounds (VOCs). In *Molecules* (Vol. 28, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/molecules28041598>
- Ercolani, C., & Martinoli, A. (2020). 3D odor source localization using a micro aerial vehicle: System design and performance evaluation. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341501>
- Ercolani, C., Tang, L., & Martinoli, A. (2022). GaSLAM: An Algorithm for Simultaneous Gas Source Localization and Gas Distribution Mapping in 3D. *IEEE International*

Conference on Intelligent Robots and Systems, 2022-October.
<https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981976>.

Fan, H., Bennetts, V. H., Schaffernicht, E., & Lilienthal, A. J. (2019). Towards gas discrimination and mapping in emergency response scenarios using a mobile robot with an electronic nose. *Sensors (Switzerland)*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/s19030685>

Feng, Q., Cai, H., Li, F., Liu, X., Liu, S., & Xu, J. (2019). An improved particle swarm optimization method for locating time-varying indoor particle sources. *Building and Environment*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.008>

FISPQ - Etanol Anidro Combustível EAC. Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico. Disponível em: <https://www.vibraenergia.com.br/sites/default/files/2021-09/fispq-comb-etanol-etanol-anidro-combustivel-eac.pdf>. Acesso em: outubro de 2022.

Francis, A., Li, S., Griffiths, C., & Sienz, J. (2022). Gas source localization and mapping with mobile robots: A review. *Journal of Field Robotics*, 39(8), 1341–1373.
<https://doi.org/10.1002/rob.22109>

Giernacki, W., Horla, D., & Sadalla, T. (2016). Mathematical models database (MMD ver. 1.0) non-commercial proposal for researchers. 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2016.
<https://doi.org/10.1109/MMAR.2016.7575196>

Giernacki, W., Skwierczyński, M., Witwicki, W., Wroński, P., & Koziński, P. (2017). Crazyflie 2.0 quadrotor as a platform for research and education in robotics and control engineering. 2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2017. <https://doi.org/10.1109/MMAR.2017.8046794>

He, X., Bourne, J. R., Steiner, J. A., Mortensen, C., Hoffman, K. C., Dudley, C. J., Rogers, B., Crokek, D. M., & Leang, K. K. (2019). Autonomous Chemical-Sensing Aerial Robot for Urban/Suburban Environmental Monitoring. *IEEE Systems Journal*, 13(3).
<https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2905807>

Huang, X. F., Zhang, B., Xia, S. Y., Han, Y., Wang, C., Yu, G. H., & Feng, N. (2020). Sources of oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) in urban atmospheres in North and South China. *Environmental Pollution*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114152>

International Labour Organization – Absolute Ethyl alcohol -
https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_version=2&p_card_id=0044 (acesso em setembro, 2023)

Jing, T., Meng, Q. H., & Ishida, H. (2021). Recent Progress and Trend of Robot Odor Source Localization. In *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* (Vol. 16, Issue 7). <https://doi.org/10.1002/tee.23364>

Kamal, M. S., Razzak, S. A., & Hossain, M. M. (2016). Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs) - A review. In *Atmospheric Environment* (Vol. 140).
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.031>

Kersnovski, T., Gonzalez, F., & Morton, K. (2017). A UAV system for autonomous target detection and gas sensing. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943675>

LANDRY, B. Planning and control for quadrotor flight through cluttered environments. Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2015.

Leonardi, S. G., Mirzaei, A., Bonavita, A., Santangelo, S., Frontera, P., Pantò, F., Antonucci, P. L., & Neri, G. (2016). A comparison of the ethanol sensing properties of -iron oxide nanostructures prepared via the sol-gel and electrospinning techniques. *Nanotechnology*, 27(7). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/7/075502>

LIMA, Gabriela Vieira. Planejamento de trajetórias para quadricópteros em tarefas de perseguição. 2019. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2536>.

Lin, T., Lv, X., Hu, Z., Xu, A., & Feng, C. (2019). Semiconductor metal oxides as chemoresistive sensors for detecting volatile organic compounds. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 19, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/s19020233>

Lindinger, C., Pollien, P., Ali, S., Yerezian, C., Blank, I., & Märk, T. (2005). Unambiguous identification of volatile organic compounds by proton-transfer reaction mass spectrometry coupled with GC/MS. *Analytical Chemistry*, 77(13). <https://doi.org/10.1021/ac0501240>

Luo, B., Meng, Q. H., Wang, J. Y., & Zeng, M. (2018). A flying odor compass to autonomously locate the gas source. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(1). <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2759378>

Malaver, A., Motta, N., Corke, P., & Gonzalez, F. (2015). Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases. *Sensors (Switzerland)*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/s150204072>

Martinez, D., Burgués, J., & Marco, S. (2019). Fast measurements with MOX sensors: A least-squares approach to blind deconvolution. *Sensors (Switzerland)*, 19(18). <https://doi.org/10.3390/s19184029>

Maung, T. Z., Bishop, J. E., Holt, E., Turner, A. M., & Pfrang, C. (2022). Indoor Air Pollution and the Health of Vulnerable Groups: A Systematic Review Focused on Particulate Matter (PM), Volatile Organic Compounds (VOCs) and Their Effects on Children and People with Pre-Existing Lung Disease. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 14). <https://doi.org/10.3390/ijerph19148752>

Michalski, J., Retinger, M., Koziński, P., & Giernacki, W. (2023). Position Control of Crazyflie 2.1 Quadrotor UAV Based on Active Disturbance Rejection Control. 2023 *International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICUAS57906.2023.10156505>

Monroy, J., Ruiz-Sarmiento, J. R., Moreno, F. A., Melendez-Fernandez, F., Galindo, C., & Gonzalez-Jimenez, J. (2018). A semantic-based gas source localization with a mobile robot combining vision and chemical sensing. *Sensors*, 18(12), 4174.

Nazemi, H., Joseph, A., Park, J., & Emadi, A. (2019). Advanced micro-and nano-gas sensor technology: A review. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 19, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/s19061285>

Neubert, S., Roddelkopf, T., Al-Okby, M. F. R., Junginger, S., & Thurow, K. (2021). Flexible IoT gas sensor node for automated life science environments using stationary and mobile robots. *Sensors*, 21(21). <https://doi.org/10.3390/s21217347>.

Neumann, P. P., Hüllmann, D., & Bartholmai, M. (2019a). Concept of a gas-sensitive nano aerial robot swarm for indoor air quality monitoring. *Materials Today: Proceedings*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.151>.

Neumann, P. P., Hirschberger, P., Baurzhan, Z., Tiebe, C., Hofmann, M., Hullmann, D., & Bartholmai, M. (2019b). Indoor Air Quality Monitoring using flying Nanobots: Design and Experimental Study. *ISOEN 2019 - 18th International Symposium on Olfaction and Electronic Nose, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ISOEN.2019.8823496>

Norzam, W. A. S., Hawari, H. F., Kamarudin, K., Juffry, Z. H. M., Hussein, N. A. A., Gupta, M., & Abdullah, A. N. (2023). Mobile Robot Gas Source Localization Using SLAM-GDM with a Graphene-Based Gas Sensor. *Electronics (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/electronics12010171>

Palacín, J., Martínez, D., Clotet, E., Pallejà, T., Burgués, J., Fonollosa, J., Pardo, A., & Marco, S. (2019). Application of an array of metal-oxide semiconductor gas sensors in an assistant personal robot for early gas leak detection. *Sensors (Switzerland)*, 19(9). <https://doi.org/10.3390/s19091957>

Palacín, J., Rubies, E., Clotet, E., & Martínez, D. (2022). Classification of Two Volatiles Using an eNose Composed by an Array of 16 Single-Type Miniature Micro-Machined Metal-Oxide Gas Sensors. *Sensors*, 22(3). <https://doi.org/10.3390/s22031120>

Pandey, P., & Yadav, R. (2018). A Review on Volatile Organic Compounds (VOCs) as Environmental Pollutants: Fate and Distribution. *International journal of plant and environment*, 4(02). <https://doi.org/10.18811/ijpen.v4i02.2>

Papale, L., Catini, A., Capuano, R., Allegra, V., Martinelli, E., Palmacci, M., Tranfo, G., & di Natale, C. (2023). Personal VOCs Exposure with a Sensor Network Based on Low-Cost Gas Sensor, and Machine Learning Enabled Indoor Localization. *Sensors*, 23(5). <https://doi.org/10.3390/s23052457>

Park, J., Jumu, F., Power, J., Richard, M., Elsahli, Y., Jarkas, M. A., Ruan, A., Luican-Mayer, A., & Ménard, J. M. (2022). Drone-Mountable Gas Sensing Platform Using Graphene Chemiresistors for Remote In-Field Monitoring. *Sensors*, 22(6). <https://doi.org/10.3390/s22062383>

Pochwała, S., Gardecki, A., Lewandowski, P., Somogyi, V., & Anweiler, S. (2020). Developing of low-cost air pollution sensor—Measurements with the unmanned aerial vehicles in Poland. *Sensors (Switzerland)*, 20(12). <https://doi.org/10.3390/s20123582>

- Rahbar, F., Marjovi, A., Kibleur, P., & Martinoli, A. (2017). A 3-D bio-inspired odor source localization and its validation in realistic environmental conditions. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017-September*.
<https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206252>
- Rossi, M., Brunelli, D., Adami, A., Lorenzelli, L., Menna, F., & Remondino, F. (2014). Gas-drone: Portable gas sensing system on UAVs for gas leakage localization. *Proceedings of IEEE Sensors, 2014-December* (December). <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985282>
- Rossi, M., & Brunelli, D. (2016). Autonomous gas detection and mapping with unmanned aerial vehicles. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(4).
<https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2506319>
- Sánchez-Sosa, J. E., Castillo-Mixcóatl, J., Beltrán-Pérez, G., & Muñoz-Aguirre, S. (2018). An application of the Gaussian plume model to localization of an indoor gas source with a mobile robot. *Sensors (Switzerland)*, 18(12). <https://doi.org/10.3390/s18124375>
- Sato, R., Tanaka, K., Ishida, H., Koguchi, S., Ramirez, J. P. R., Matsukura, H., & Ishida, H. (2020). Detection of gas drifting near the ground by drone hovering over: Using airflow generated by two connected quadcopters. *Sensors (Switzerland)*, 20(5).
<https://doi.org/10.3390/s20051397>
- Seiyama, T., & Kagawa, S. (1966). Study on a Detector for Gaseous Components Using Semiconductive Thin Films. *Analytical Chemistry*, 38(8).
<https://doi.org/10.1021/ac60240a031>
- Sensirion.com, Sensirion – Products and Catalogs.
<https://sensirion.com/products/catalog/SGP40> (Acesso em Agosto, 2023).
- Shigaki, S., & Fikri, M. R. (2018). Design and experimental evaluation of an odor sensing method for a pocket-sized quadcopter. *Sensors (Switzerland)*, 18(11).
<https://doi.org/10.3390/s18113720>
- Shigaki, S., Yoshimura, Y., Kurabayashi, D., & Hosoda, K. (2022). Palm-Sized Quadcopter for Three-Dimensional Chemical Plume Tracking. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3218316>
- Souza, Rafael Monteiro Jorge Alves de. Sistema de identificação de fonte de gás utilizando nanoquadricóptero. 2022, 80f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.496>
- Spinelle, L., Gerboles, M., Kok, G., Persijn, S., & Sauerwald, T. (2017). Review of portable and low-cost sensors for the ambient air monitoring of benzene and other volatile organic compounds. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 17, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/s17071520>
- Suman, P. H., Weimar, U., Barsan, N., & Orlandi, M. O. (2021). Chemoresistive Gas Sensors Based on SnO₂ and Sn₃O₄ Nanobelts to Volatile Organic Compounds Detection: A Comparative Investigation. *ECS Meeting Abstracts*, MA2021-01(56).
<https://doi.org/10.1149/ma2021-01561458mtgabs>

Takei, Y., Kanazawa, Y., Hirasawa, K., & Nanto, H. (2019). Development of 3D gas source localization using multi-copter with gas sensor array. *ISOEN 2019 - 18th International Symposium on Olfaction and Electronic Nose, Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/ISOEN.2019.8823396>

Terutsuki, D., Uchida, T., Fukui, C., Sukekawa, Y., Okamoto, Y., & Kanzaki, R. (2021). Real-time odor concentration and direction recognition for efficient odor source localization using a small bio-hybrid drone. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 339.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129770>

Tran, V. P., Garratt, M. A., Kasmarik, K., Anavatti, S. G., Leong, A. S., & Zamani, M. (2023). Multi-gas source localization and mapping by flocking robots. *Information Fusion*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.11.001>

Yamazoe, N. (2005). Toward innovations of gas sensor technology. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 108(1-2 SPEC. ISS.). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.12.075>

Yuan, H., Xiao, C., Wang, Y., Peng, X., Wen, Y., & Li, Q. (2020). Maritime vessel emission monitoring by an UAV gas sensor system. *Ocean Engineering*, 218.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108206>

Yurko, G., Roostaei, J., Dittrich, T., Xu, L., Ewing, M., Zhang, Y., & Shreve, G. (2019). Real-time sensor response characteristics of 3 commercial metal oxide sensors for detection of btex and chlorinated aliphatic hydrocarbon organic vapors. *Chemosensors*, 7(3).
<https://doi.org/10.3390/CHEMOSENSORS7030040>

Zhang, X., Xian, B., Zhao, B., & Zhang, Y. (2015). Autonomous Flight Control of a Nano Quadrotor Helicopter in a GPS-Denied Environment Using On-Board Vision. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(10). <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2420036>.