



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Marcelo Maia da Silva

Aprimorando o entendimento de padrões de poluição do ar por meio de plataformas móveis

Belém - PA

2016

Marcelo Maia da Silva

Aprimorando o entendimento de padrões de poluição do ar por meio de plataformas móveis

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Instituto de Ciências Exatas e Naturais.

Universidade Federal do Pará.

Área de Concentração: Sistemas Inteligentes
Orientador Dr. Gustavo Pessin

Universidade Federal do Pará – UFPA

Instituto de Ciências Exatas e Naturais

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: Gustavo Pessin

Belém - PA

2016

Marcelo Maia da Silva

Aprimorando o entendimento de padrões de poluição do ar por meio de plataformas móveis

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Instituto de Ciências Exatas e Naturais.

Universidade Federal do Pará.

Área de Concentração: Sistemas Inteligentes
Orientador Dr. Gustavo Pessin

Trabalho aprovado. Belém - PA, 05 de Agosto de 2016:

Gustavo Pessin
(UFPA) Orientador

Denis Lima do Rosário
(UFPA) Membro interno

Jorge Luis Victória Barbosa
(UNISINOS) Membro externo

Belém - PA

2016

*Dedico este Mestrado a minha mãe, Teresa Maia da Silva
por todo amor, doação e sacrifício.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por sempre estar ao meu lado. Ao Gustavo Pessin pela orientação e grande suporte que me deu nessa pesquisa. Aos integrantes do laboratório de computação do ITV-DS, que tiveram uma participação indispensável neste trabalho; em especial ao Bruno Ferreira, Gerson Serejo e Mylena Reis. Aos colegas do ICMC-USP que me receberam e deram suporte na implementação do VANT, em especial ao Bruno Faícal, Heitor Freitas e Jó Ueyama. Agradeço também à CAPES pela bolsa de mestrado, que sem ela não seria possível terminar este trabalho.

*A persistência é o caminho do êxito.
Charles Chaplin.*

Resumo

Atividades humanas, como geração de energia, movimentação de veículos e queimadas são grandes emissoras de poluentes atmosféricos. Muitos destes elementos poluidores são prejudiciais ao meio ambiente e aos seres humanos. Ainda, é comum o desconhecimento dos níveis de poluição do ar dentro e fora de casa; se o ser humano tiver conhecimento do quanto tem contato com a poluição, e for alertado disso, ele pode mudar sua atitude e, assim, podemos ter maior chance de evitar problemas decorrentes da poluição. Essa dissertação está inserida no contexto do desenvolvimento e emprego de sistemas móveis para monitoramento de monóxido de carbono, objetivando prover mecanismos para o entendimento dos padrões de poluição. Este documento apresenta a proposta de um sistema que integre *hardware* e *software* para coleta de poluentes e variáveis climáticas, como monóxido de carbono, temperatura e umidade. O sistema é portátil para facilitar seu transporte. Ainda, são realizadas avaliações (coletas reais e análises) em três estudos de caso, a fim de entender padrões de poluição e variáveis ambientais nos três diferentes contextos. Resultados dos experimentos mostram o comportamento do CO ao longo dos dias da semana, indicam as localizações mais poluídas dentro de um percurso a pé e de ônibus e expõem variações de temperatura ao longo de dois voos com veículos aéreos não tripulados.

Palavras-chave: poluição, qualidade do ar, monóxido de carbono, veículo aéreo não tripulado

Abstract

Human activities such as power generation, drive vehicles and fires are large emitters of air pollutants. Many of these polluting elements are harmful to the environment and humans. Yet, it is common the unawareness of air pollution levels inside and outside home; if the human being becomes aware of how much has contact with pollution, and been warned of this, his attitude can be changed, this way, we have more chances to avoid problems caused by pollution. This thesis is inserted in context of development and deployment of mobile systems for carbon monoxide monitoring, aiming to provide mechanisms to understand the pollution standards. This document presents a system proposal that integrates hardware and software to collect pollutants and climatic variables, such as carbon monoxide, temperature and humidity. The system is portable for easy transport. Yet, evaluations are made (real collection and analysis) in three case studies, in order to understand pollution standards and environmental variables in three different contexts. Experiment results show the CO's behavior along weekdays, indicate the most polluted locations within a walking and bus route and expose temperature variations over two flights with unmanned aerial vehicle.

Key-words: pollution, air quality, carbon monoxide, unmanned aerial vehicle.

Listas de ilustrações

Figura 1 – Estações de monitoramento de qualidade do ar no Brasil, onde os círculos denotam o número de estações por município e as intensidades das colorações dos estados denotam as respectivas densidades populacionais. Fonte: (VORMITTAG et al., 2014).	24
Figura 2 – Monitoramento de poluentes aplicado no trabalho de (WEN et al., 2013), onde cada nó apresentou picos diferentes de acordo com o horário, isto se deu em função do fluxo de carros na rotatória.	29
Figura 3 – (a) Um campo de plantação representado numa matriz 2D. A variação de vermelho para verde significa menos pesticidas recebidos. A maior parte da área está vermelha por que os sensores são pontuais. A distribuição de pesticidas está desigual devido à variação de vento na simulação. (b) Mapa após aplicação de técnica de interpolação. (c) Mapa após a aplicação de um limiar, que determina onde há menos pesticida. (d) Identificação por agrupamento usando o algoritmo DBSCAN (FAIÇAL et al., 2014).	32
Figura 4 – (a) O caminho de coleta do quadroto dentro da estufa, os pontos no traçado são os locais de coleta. (b) Mapa de temperatura dentro da estufa (ROLDÁN et al., 2015).	32
Figura 5 – (a) Exemplo de uma pluma do vulcão Etna. (b) Exemplo de uma missão de coleta, onde (1) é largada, (2) alcançando a pluma, (3) fase de coleta, (4) preparação para pouso e (5) pouso (CALTABIANO et al., 2005).	33
Figura 6 – A poluição de óleo identificada por uma câmera em VANT. Para obter o tamanho da área contaminada, foi usado o algoritmo K-means para classificar a imagem (ZANG et al., 2012).	33
Figura 7 – (a) Protótipo de coleta de CO: (1) detector de CO MQ-2, (2) sensor de temperatura e umidade DHT11, (3) barômetro BMP180, (4) bateria 9v e (5) Arduino Uno, DS1307 e cristal 32.768 usados para o relógio do Arduino e SD-card. (b) protótipo empacotado. (c) esquema de circuito do protótipo.	36
Figura 8 – (a) Sensor MQ-2 usado para detectar LPG, butano, propano, metano, álcool, hidrogênio e fumaça. (b) Sensor de CO MQ-7. (c) Cabeamento de ambos sensores.	37
Figura 9 – Curva de sensibilidade de MQ-2 para os gases sob as condições de: temperatura 20 °C, umidade 65 %, concentração de O ₂ de 21 % e RL de 5 Ω, nota-se que RS/RO é constante para o ar nas dadas condições (ELECTRONICS, 2014a).	38

Figura 10 – Sinal quando o sensor é mudado de um ar limpo para um recipiente com 100 ppm de CO. O ciclo de aquecimento do sensor MQ-7 dura 2.5 min (ELECTRONICS, 2014b)	38
Figura 11 – Sensor de umidade DHT11. Onde (1) VCC, (2) dados, (3) não conectado, e (4) terra	39
Figura 12 – Sensor de pressão e temperatura BMP180.	39
Figura 13 – (a) O controlador Arduino em uma caixa de proteção. (b) Sensores MQ-2, BMP180 e DHT11. (c) VANT MikroKopter Okto, com oito hélices classe III.	40
Figura 14 – MikroKopter Hexa, usado no trabalho de Vieira (2015), este equipado com o módulo UAV <i>Brain</i> destacado entre os trens de pouso.	41
Figura 15 – (a) vista frontal, (b) vista superior, (c) vista traseira, i) rádio transceptor ZigBee, ii) Arduino Nano, iii) Raspberry Pi, iv) power meter shield, v) sensor de umidade e temperatura (VIEIRA, 2015).	41
Figura 16 – (a) Protótipo de coleta de CO e variáveis climáticas. (b) Distância do protótipo em relação a uma esquina de duas ruas movimentadas no centro de Belém do Pará.	45
Figura 17 – Variação de monóxido de carbono em local fixo e ar livre ao longo dos dias. O eixo x é referente às datas e o eixo y significa a concentração de CO. Onde os pontos azuis são as médias, o tamanho dos traços são as suas respectivas variâncias, o pontos verdes são finais de semana, e o laranja foi feriado no município de Belém do Pará. Nota-se um desvio e média menores durante os fins de semana. Destaca-se o feriado que apresentou a menor concentração de CO, devido a redução do fluxo de veículos neste dia.	46
Figura 18 – Variação de CO ao longo das horas do dia. Foram utilizados os dados da coleta em ambiente fixo e aberto. Durante os dias de semana principalmente, nota-se uma grande variação de CO entre as 7:00 às 9:00 e outro pico entre as 17:00 até as 19:00	47
Figura 19 – Protótipo de computação vestível onde (a) é coleta dentro de ônibus próximo à janela e (b) coleta a pé. Em ambos os casos o protótipo foi carregado na altura do peito do usuário.	48

Figura 20 – <i>Heatmap</i> de concentração de monóxido de carbono. Coletas feitas em ônibus (a, c, e) e a pé (b, d, f) por um percurso de 1,82 km. Os dados são normalizados. Em destaque nas figuras (a), (c) e (e), uma maior concentração de CO, apesar do fluxo de veículos ser grande ao longo do percurso, as ruas apresentam diferença grande de largura, o que implica na circulação de ar e, uma menor quantidade de CO por consequência. Em destaque nas figuras (b) e (f), observa-se uma maior concentração de CO devido a uma interseção entre três ruas movimentadas, na coleta de sexta a pé (d) não houveram muitas variações, pois, foi o dia de menor movimento.	49
Figura 21 – (a) Rua Antônio Barreto 10 m de largura, densidade de prédios. (b) Região conhecida como Doca, com 54 m de largura, maior circulação de ar em relação a (a).	50
Figura 22 – (a) Mapa de concentração de temperatura com o sensor BMP180. (b) Conjunto de <i>waypoints</i> usados pelo VANT e a área onde foi realizada a coleta, USP-São Carlos campus 2.	51
Figura 23 – Dados de temperatura considerando a variação de altura. A cor dos pontos indicam a temperatura num dado ponto de coleta. O eixo x é a variação do VANT em relação ao seu ponto inicial na latitude, o eixo y diz respeito a altura. Pode-se observar que a concentração de temperatura mostrou-se maior na altura de 40 m, também que a variação em torno do eixo x foi maior devido ao vento ser mais forte de acordo com a altura.	53

Lista de tabelas

Tabela 1 – Níveis de alerta estipulados pelo Programa Nacional de Qualidade de Ar, levando em consideração o poluente atmosférico, concentração em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e o tempo de exposição. Fonte (PRONAR, 1990)	24
Tabela 2 – Dados normalizados das seis coletas realizadas com o protótipo de computação vestível. Nota-se que a média de monóxido de carbono apresentou-se menor a pé, indicando que a exposição ao CO é maior no ônibus. Concentração > 0.5 indica uma quantidade de leituras acima de 0.5	48

Lista de abreviaturas e siglas

CO	Monóxido de carbono
GPS	Sistema de posicionamento global
LPG	Gás liquefeito de petróleo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
O ₃	Ozônio
PM10	Partículas inaláveis
PPM	Partes por milhão
PRONAR	Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
RO	Resistência inicial do sensor
RL	Resistor de carga
RS	Resistência do sensor
SO ₂	Dióxido de enxofre
TIC	Tecnologias da informação e comunicação
VANT	Veículo aéreo não tripulado

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Contextualização	23
1.1.1	Cidades Inteligentes	25
1.1.2	Motivação para coleta de CO	26
1.2	Objetivos	26
1.2.1	Objetivos Específicos	27
1.2.2	Contribuições	27
1.3	Organização da Dissertação	27
2	TRABALHOS RELACIONADOS	29
2.1	Trabalhos com análise de poluentes	29
2.2	Trabalhos com VANTS	31
2.3	Discussão dos trabalhos relacionados	33
3	METODOLOGIA	35
3.1	Protótipo	35
3.1.1	Arduino	35
3.1.2	Sensor de CO MQ-2	36
3.1.3	Sensor de CO MQ-7	37
3.1.4	Sensor de temperatura e umidade DHT11	38
3.1.5	Sensor de pressão barométrica BMP180	39
3.1.6	Integração com o VANT	39
3.2	Metodologia de coleta e análise em localização fixa	41
3.3	Metodologia de coleta e análise em diferentes meios de locomoção	42
3.4	Metodologia de coleta e análise empregada em plataforma móvel (VANT)	42
3.5	Considerações Finais	43
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	45
4.1	Coleta em localização fixa	45
4.2	Coleta móvel: análise de CO em diferentes meios de transporte	47
4.3	Coleta com VANT em zigue-zague e variação de altura	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	55
5.1	Trabalhos Futuros	55
5.2	Artigos e conquistas	55

5.2.1	Um veículo aéreo não tripulado para encontrar focos de poluição	56
5.2.2	Entendendo padrões de poluição com ferramentas de hardware e software livres	56
	Referências	57

1 Introdução

Qualidade de vida e sustentabilidade são temas que têm ganhado muita atenção nos últimos anos. Enquanto vários avanços tecnológicos têm tornado a vida mais confortável, algumas dessas inovações têm sido correlacionadas ao aumento dos índices de poluição. A geração de energia, os veículos e as queimadas são, em conjunto, os maiores emissores de poluentes, produzidos pelo homem, à atmosfera (MMA, 2014). Muitos destes elementos poluidores, como o monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), aldeídos e materiais particulados¹ (PM10) são prejudiciais ao meio ambiente e aos seres humanos. De acordo com o Artigo 1º da resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 3 (1990):

Entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

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

A contextualização, a motivação e os objetivos desta pesquisa serão apresentados no decorrer deste Capítulo.

1.1 Contextualização

No Brasil, de acordo com o primeiro diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar (VORMITTAG et al., 2014), somente 40% das unidades federativas empregam monitoramento de qualidade de ar. Como pode ser visto na Figura 1, das 252 unidades de monitoramento, 76% estão no sudeste e 13% na região sul. No contexto de qualidade do ar, sensores são capazes de medir os poluentes, que possuem níveis de alerta em função da concentração e tempo definidos pelo Programa Nacional de Qualidade de Ar (PRONAR), como apresenta a Tabela 1.

Sensores são muito usados no cotidiano para realizar medições de diferentes naturezas em variadas situações. Alguns são bastante conhecidos, como termômetros, sensores de presença, sensores de incêndio, dentre outros. Sensores em geral realizam funções relevantes nos contextos nos quais são inseridos, como hospitais, minas, residências e indústrias, onde

¹ É uma mistura complexa de sólidos com diâmetro reduzido, cujos componentes apresentam características físicas e químicas diversas. Em geral o material particulado é classificado de acordo com o diâmetro das partículas, devido à relação existente entre diâmetro e possibilidade de penetração no trato respiratório (MMA, 2014).

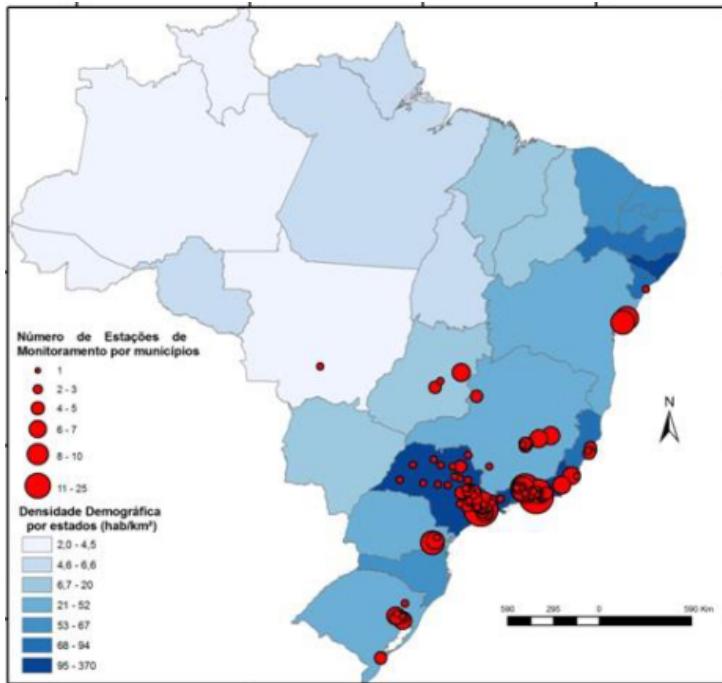


Figura 1 – Estações de monitoramento de qualidade do ar no Brasil, onde os círculos denotam o número de estações por município e as intensidades das colorações dos estados denotam as respectivas densidades populacionais. Fonte: ([VORMITTAG et al., 2014](#)).

Tabela 1 – Níveis de alerta estipulados pelo Programa Nacional de Qualidade de Ar, levando em consideração o poluente atmosférico, concentração em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e o tempo de exposição. Fonte ([PRONAR, 1990](#))

	SO ₂ /24h	CO/8h	O ₃ /1h	PM ₁₀ /24h
Aenção	800	17000(15ppm)	400	250
Alerta	1600	34000(30ppm)	800	420
Emergência	2100	46000(40ppm)	1000	500

são usados, por exemplo, para alertar sobre riscos de inundações ([FURQUIM et al., 2014](#)) e na agricultura para otimizar o uso de pesticidas ([FAIÇAL et al., 2014](#)).

Normalmente, estações de monitoramento de qualidade do ar são equipamentos caros, instalados em localizações fixas, responsáveis por monitorar uma grande área ([DEVARAKONDA et al., 2013](#)). Com o uso de um dispositivo sensorial, de baixo custo, proposto neste trabalho, é possível facilitar coletas e análises para o entendimento dos padrões das poluições em diversas localidades e contextos. No contexto deste trabalho, temos um dispositivo que pode ser transportado por um humano ou um veículo aéreo não tripulado (VANT). Esse dispositivo é composto por sensores que coletam variáveis climáticas (como temperatura e umidade) e poluentes atmosféricos (CO). Dessa forma, esse trabalho segue a tendência dos trabalhos em cidades inteligentes, que buscam prover serviços públicos novos ou otimizá-los. Na sequência será apresentada uma descrição sucinta sobre cidades inteligentes.

1.1.1 Cidades Inteligentes

Uma cidade inteligente é um sistema urbano que usa tecnologias da informação e comunicação (TIC) para fazer sua estrutura e serviços públicos mais interativos, acessíveis e inteligentes. É uma cidade comprometida com seu ambiente, em termos culturais, históricos e ambientais, onde a infraestrutura é equipada com as soluções tecnológicas mais avançadas para facilitar interação dos cidadãos com elementos urbanos ([PELLICER et al., 2013](#)). Há vários campos de atividade que podem ser descritos na literatura em relação ao termo cidades inteligentes: industrial, educacional, técnico, ambiental, etc. No trabalho de Giffinger et al. ([2007](#)) são expostas seis características típicas de cidades inteligentes:

- Economia inteligente (competitividade): foca em inovação, empreendedorismo, imagem econômica, marcas, produtividade, flexibilidade, inserção internacional e habilidade de transformar.
- Capital social e humano inteligentes: cidades sustentáveis precisam ser suportadas por um capital humano devidamente qualificado para acompanhar sua evolução e crescimento. Logo, no capital social e humano, são considerados: nível de qualificação, afinidade para a aprendizagem ao longo da vida, multiplicidade étnica e social, flexibilidade, criatividade, cosmopolitismo, e a participação na vida pública.
- Governança inteligente (participação): nesta categoria, são considerados todos os procedimentos relacionados com participação pública como tomadas de decisão, serviços sociais e públicos, governança transparente e estratégias políticas.
- Mobilidade inteligente (transporte e TIC): transporte é algo vital para a sociedade, contudo, o modo como é usado hoje não é sustentável (emissão de poluentes, barulho, congestionamentos e acidentes). Por esse motivo, novas tecnologias de transporte e sistemas de administração de tráfego têm sido estudados. Acessibilidade local, acessibilidade internacional, disponibilidade de infraestrutura de TIC, transporte sustentável seguro e inovador são alguns temas em destaque sobre mobilidade inteligente.
- Ambiente inteligente (recursos naturais): Cidades inteligentes têm um amplo leque de desenvolvimento e evolução no campo de eficiência energética e gestão de recursos naturais. Nesta linha de desenvolvimento são considerados: poluição, proteção ambiental e gestão sustentável de recursos.
- Vida inteligente (qualidade de vida): o poder público objetiva prover serviços novos e melhorados para a população buscando o desenvolvimento da cidade e qualidade de vida aos cidadãos. Os aspectos abordados são: cultura, condição de saúde, segurança individual, qualidade da habitação, ferramentas educacionais, atratividade turística e

coesão social. Esses serviços variam desde agenda cultural e turística para visitantes até a área de saúde e educação.

Resumidamente, o objetivo de uma cidade inteligente é alcançar eficiência em várias áreas de uma cidade, variando desde mobilidade urbana e saúde pública até educação e turismo, onde vários serviços são otimizados sob o ponto de vista individual e coletivo. O presente trabalho insere-se, principalmente, nas categorias capital social e humano (participação das pessoas), governança (tomada de decisões e serviços sociais), ambiente inteligente (para monitoramento de poluição) e vida inteligente (saúde pública).

Para monitoramento de poluição deste trabalho foi o monóxido de carbono, pois, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2014), o mesmo reflete fortemente emissão de poluentes de veículos em uma cidade. Abaixo, segue uma descrição sucinta da motivação de coleta e análise de CO realizada neste trabalho.

1.1.2 Motivação para coleta de CO

O monóxido de carbono é um gás que não possui cor nem cheiro. É formado a partir da combustão incompleta de materiais que tenham carbono, normalmente devido à falta de oxigênio. A maior parte de suas emissões em centros urbanos se dá devido a veículos automotores (MMA, 2014). Segundo Leroux e Morata (2005), a principal via para exposição ao monóxido de carbono é a respiratória. A afinidade da hemoglobina² pelo CO chega a ser 240 vezes maior que pelo O₂, intoxicações agudas podem ser fatais devido a forte atração da hemoglobina com o CO.

O risco proveniente de exposições prolongadas, mesmo em concentrações baixas, é elevado para indivíduos que sofrem de doenças respiratórias e insuficiência cardíaca. Pessoas que inalam elevados níveis de CO podem desenvolver problemas do fôro visual, redução da capacidade de aprendizagem ou de trabalho, diminuição da destreza manual e dificuldade na execução de tarefas complexas (SILVA; MENDES, 2006).

1.2 Objetivos

Esta dissertação de mestrado objetiva a proposta, o desenvolvimento e a avaliação de um dispositivo (sistema de *hardware* e *software*) para coleta de monóxido de carbono e variáveis climáticas, transportável por uma pessoa ou por um VANT. Além disso, é objetivo do trabalho o emprego e a proposta de métodos de análise de dados em três estudos de caso, notadamente: (i) coleta e análise de CO em ponto fixo, (ii) coleta e análise de CO em diferentes meios de transporte, e (iii) emprego do dispositivo em coleta e análise por meio de integração com um VANT.

² Que é responsável por transportar oxigênio aos tecidos do corpo.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Proposta de sistema que integre *hardware* e *software* para coleta de poluentes e variáveis climáticas, como monóxido de carbono, temperatura e umidade. O sistema deve ser portátil para facilitar seu transporte.
- Avaliação do sistema em três estudos de caso, descritos acima, a fim de entender padrões de poluição e variáveis ambientais em três diferentes contextos.
- Proposta de métodos para análise de poluentes em localizações dinâmicas e estáticas.

1.2.2 Contribuições

Este trabalho possui contribuições de cunho social, industrial, científico e tecnológico. Dentre essas contribuições, as principais são apresentadas a seguir:

- Social: prover mecanismos para a mensuração da poluição urbana, para que as pessoas possam conscientizarem-se, mudar seu comportamento e também cobrar por melhorias do poder público no âmbito ambiental.
- Industrial: da mesma forma que a contribuição social, este trabalho deve fornecer ferramentas para melhorar o entendimento da poluição gerada pelas indústrias, a fim de que os responsáveis possam tomar atitudes que diminuam a geração de poluentes ou melhore o tratamento desses.
- Científica: as contribuições deste trabalho são enumeradas em: (i) proposta de sensoriamento de gases poluentes com sensores de baixo custo e (ii) apresentação de resultados originais de análises com localizações estáticas e dinâmicas.
- Tecnológica: as contribuições tecnológicas deste projeto são perceptíveis e determinam sua importância no momento em que outras pessoas poderão ter acesso aos mesmos resultados em suas cidades a partir do código fonte desenvolvido, da arquitetura de *hardware* e das metodologias de coleta disponíveis para *download*³.

1.3 Organização da Dissertação

A organização estrutural desta dissertação segue apresentando, no Capítulo 2, uma revisão da literatura na área de qualidade de ar, visando relacionar trabalhos da literatura com esta dissertação. No Capítulo 3 é descrito o modelo proposto para o monitoramento, detalhando o protótipo de *hardware* e *software* e as metodologias de coleta. Na sequência, no Capítulo 4 são apresentados os resultados alcançados e, finalmente, no Capítulo 5, traz considerações finais e trabalhos futuros.

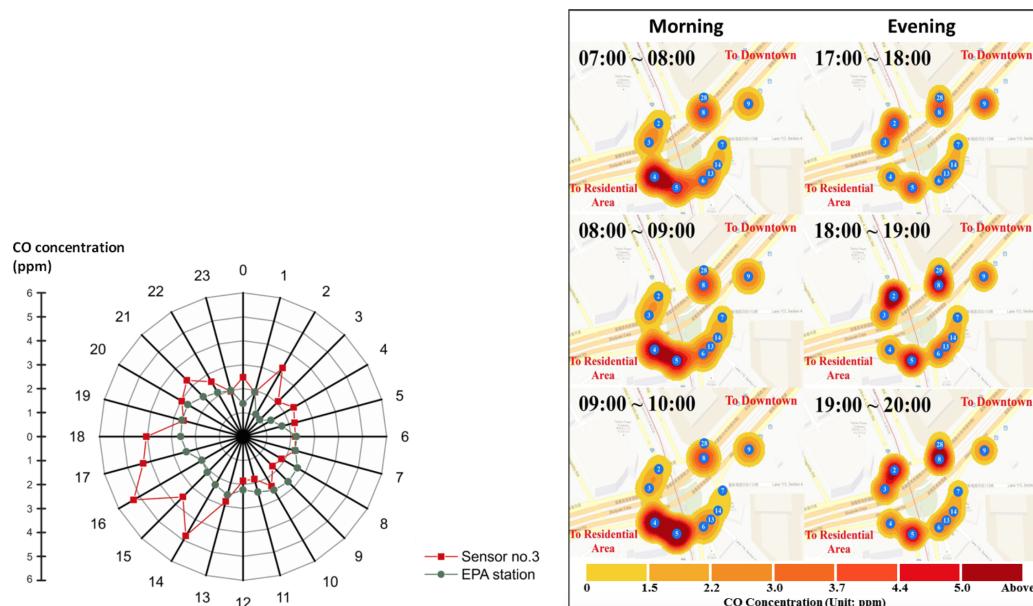
³ <https://github.com/marcelomaia/ArduinoAirQuality>

2 Trabalhos Relacionados

Neste Capítulo são apresentados os trabalhos relacionados, com a finalidade de fornecer subsídios aos Capítulos posteriores. Na Seção 2.1 são expostos trabalhos com análises de poluentes. Na Seção 2.2 são apresentados trabalhos práticos implementados com veículo aéreo não tripulado. Finalmente, na Seção 2.3 é apresentada uma discussão sobre os trabalhos relacionados.

2.1 Trabalhos com análise de poluentes

O trabalho proposto por Wen et al. (2013) apresenta a proposta e desenvolvimento de uma metodologia de coleta de partículas de CO em um ambiente urbano. No estudo, os autores apresentam um dispositivo de baixo custo, usando como referencial de calibração dispositivos instalados pela Administração de Proteção Ambiental de Taiwan. A Figura 2 mostra os resultados de coletas em partes por milhão (PPM) em um dia de semana, detalhando um a medida do sensor nº 3 na Figura 2a, bem como a indicação de um mapa de calor do conjunto de sensores na Figura 2b. Manna, Bhunia e Mukherjee (2014)



- (a) Concentração de CO do sensor nº 3 ao longo do dia.
(b) Heatmap expondo variação de CO ao longo do dia para um conjunto de sensores ao redor de uma rotatória.

Figura 2 – Monitoramento de poluentes aplicado no trabalho de (WEN et al., 2013), onde cada nó apresentou picos diferentes de acordo com o horário, isto se deu em função do fluxo de carros na rotatória.

propõem o uso de Internet das Coisas (IoT) para monitoramento de poluentes em veículos, usando uma combinação de rede de sensores sem fio (RSSF), sensores eletroquímicos de gás e o uso de identificação por rádio frequência (RFID).

Normalmente, estações de monitoramento de qualidade do ar estão aplicadas em localizações fixas e geralmente são equipamentos caros. Devarakonda et al. (2013) apresentam dois protótipos de baixo custo para medir monóxido de carbono. O primeiro foca em monitoramento de qualidade de ar em transportes públicos por meio de um *Mobile Sensing Box* e o segundo em monitoramento pessoal através de um *Personal Sensing Device*. Como meio para análise e disseminação de dados é usada computação em nuvem juntamente com os serviços do google através do *Google Fusion Tables* para gerar tabelas, gráficos e visualizações em mapa, esse apresenta uma comparação entre os dados dos dois protótipos de coleta por meio de uma análise de correlação. Tal teste foi aplicado em estradas e numa área suburbana do estado de Nova Iorque, necessitando de um estudo em áreas urbanas, as quais possivelmente apresentam uma concentração maior de poluentes.

Bales et al. (2012) sugerem um sensoriamento individual e colaborativo, em que uma pesquisa com os usuários do sistema foi realizada a fim de identificar os hábitos de uso de um sistema de comprovação para qualidade de ar, e compartilhamento dessas informações. Apresentaram um *hardware* protótipo de análise de qualidade de ar e um aplicativo que permite visualizar o histórico dos poluentes e compartilhar em redes sociais. O estudo busca investigar o hábito das pessoas em colaborar para melhorar a qualidade do ar, bem como a utilização de meios de transportes alternativos para diminuir a emissão de poluentes atmosféricos pelos usuários do protótipo.

Simek e Mraz (2013) apresentam um *framework* chamado SensMap, o qual é baseado em computação em nuvem para visualização de dados de sensores hospedados nos serviços da empresa xively¹. O trabalho foca principalmente na visualização bruta dos dados em ambientes internos e externos, sem análises. Fox et al. (2008) apresentam um sistema com sensores colaborando em grade, sensores colaborativos em grade são uma combinação de redes de sensores e computação em grade, um cliente sensor da grade que é uma sessão colaborativa que permite que os participantes possam compartilhar informações de sensores. Estas sessões colaborativas podem interagir com quaisquer combinação de sensores aplicados na grade. Neste modelo, cada sensor obtém informação de seu contexto e as publica em tempo real. Um adaptador para o sensor recebe dados de outro sensor conectado e comunica à grade. O adaptador provê dentre outras funcionalidades uma interface para cada sensor com facilidades de acesso a grade e ao serviço *web* do sistema. Este sistema processa as informações oriundas dos sensores e as retorna como dados refinados.

No trabalho de Silva e Mendes (2006) foram criados dois cenários para comparação

¹ <https://xively.com/>

de emissão de poluentes através de análises químicas em uma cidade de média dimensão em Portugal. Os dois cenários consistem em um período de coleta no verão e no inverno. Nos dados coletados no verão, os autores mostram que todos os gases pesquisados (CO , O_3 , NO_2 e $\text{PM}10$) ficaram abaixo do estabelecido pelo referente país, entretanto nas vias principais da cidade uma concentração maior de CO , NO_2 e $\text{PM}10$ foi encontrada devido a grande circulação de automóveis; nesse sentido, um alerta seria necessário a essas regiões para que não houvessem mais emissões. Alonso e Godinho (1992) indicam outro estudo químico sobre poluentes em cidades, verificam que Cubatão, cidade do interior paulista, sofria por ser considerada uma cidade poluída e, assim, diversos gases foram estudados quimicamente para comparação aos dados da década de 80, época em que era considerada uma cidade poluída. No estudo, a maioria das regiões e gases encontram-se em harmonia com o meio ambiente e dentro das regulamentações, entretanto a região da Vila Parisi, que é um local de intensa atividade industrial, ainda sofre com a ação de poluentes como fluoretos e materiais particulados.

2.2 Trabalhos com VANTS

Faiçal et al. (2014) descrevem uma arquitetura orientada ao problema de auto ajuste dinâmico de rotas de VANTS ao pulverizar produtos químicos em uma plantação, um algoritmo evolutivo é proposto e avaliado, considerando o retorno de informação oriunda de uma rede de sensores sem fio simulada, ponderando variações de vento em força e direção. A Figura 3 mostra a representação de um campo de plantação após a aplicação de produtos químicos. Após técnicas de clusterização e do algoritmo de ajuste de rota do VANT, observou-se que a arquitetura em questão pode notavelmente reduzir o desperdício de pesticidas e fertilizantes.

Roldán et al. (2015) criaram e validaram uma plataforma sensorial móvel para monitoramento de estufas. A plataforma consiste de um conjunto de sensores acoplados a um quadroto. Os objetivos desse sistema incluem capturar medidas de concentração de temperatura, umidade, luminosidade e CO_2 e gerar mapas dessas variáveis. O posicionamento dos sensores foram determinados através de um estudo da aerodinâmica do quadroto e a influência dos fluxos de ar e de seus motores. A contribuição primária do trabalho é a determinação do lugar ótimo para cada sensor, considerando o fluxo de ar. No trabalho em questão, foi mapeada a concentração de calor dentro de uma estufa como mostra a Figura 4.

Caltabiano et al. (2005) conduziram o projeto ROBOVOLC para exploração e análise de fenômeno vulcânico sem nenhuma interação humana. O veículo aéreo não tripulado teve de ser autônomo. Devido a duas dificuldades: (i) distância segura da pluma (nuvem) vulcânica e (ii) dificuldade de identificação visual do veículo. Na Figura 5 são

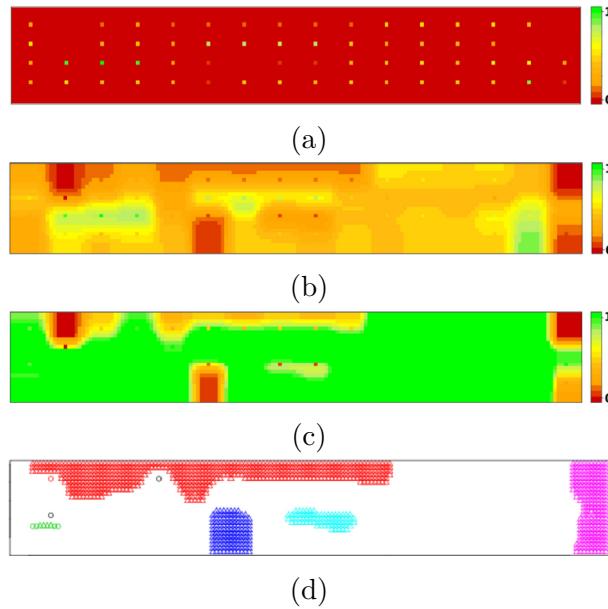


Figura 3 – (a) Um campo de plantação representado numa matriz 2D. A variação de vermelho para verde significa menos pesticidas recebidos. A maior parte da área está vermelha por que os sensores são pontuais. A distribuição de pesticidas está desigual devido à variação de vento na simulação. (b) Mapa após aplicação de técnica de interpolação. (c) Mapa após a aplicação de um limiar, que determina onde há menos pesticida. (d) Identificação por agrupamento usando o algoritmo DBSCAN (FAIÇAL et al., 2014).

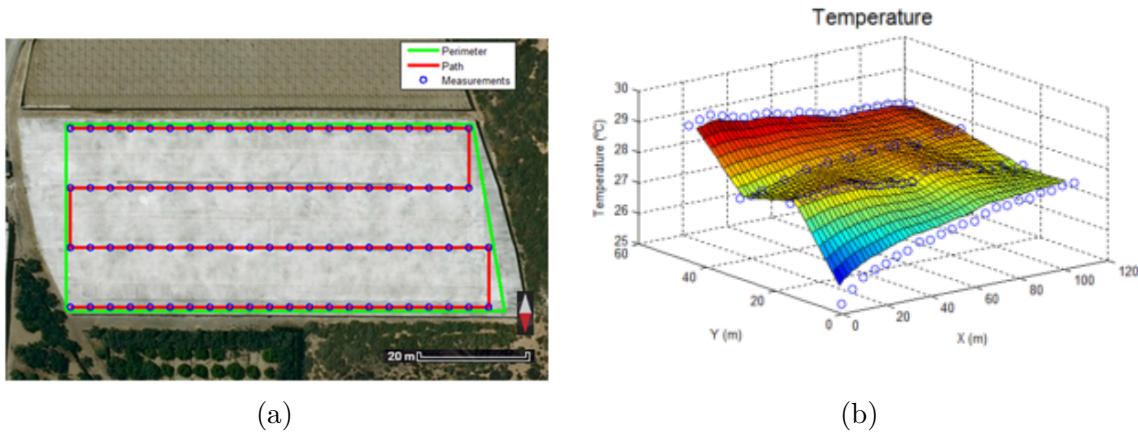


Figura 4 – (a) O caminho de coleta do quadroto dentro da estufa, os pontos no traçado são os locais de coleta. (b) Mapa de temperatura dentro da estufa (ROLDÁN et al., 2015).

apresentados o ambiente da coleta e o caminho da coleta do VANT.

Zang et al. (2012) demonstram experiências práticas em aplicar VANTS na investigação de poluentes em ambientes aquáticos no sudoeste da China, usando câmeras para análise de imagens através de técnicas de clusterização como mostra a Figura 6.

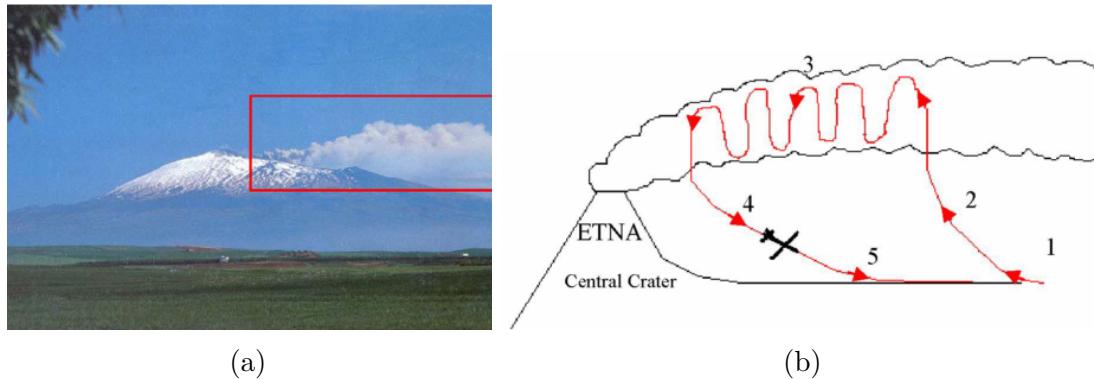


Figura 5 – (a) Exemplo de uma pluma do vulcão Etna. (b) Exemplo de uma missão de coleta, onde (1) é largada, (2) alcançando a pluma, (3) fase de coleta, (4) preparação para pouso e (5) pouso ([CALTABIANO et al., 2005](#)).

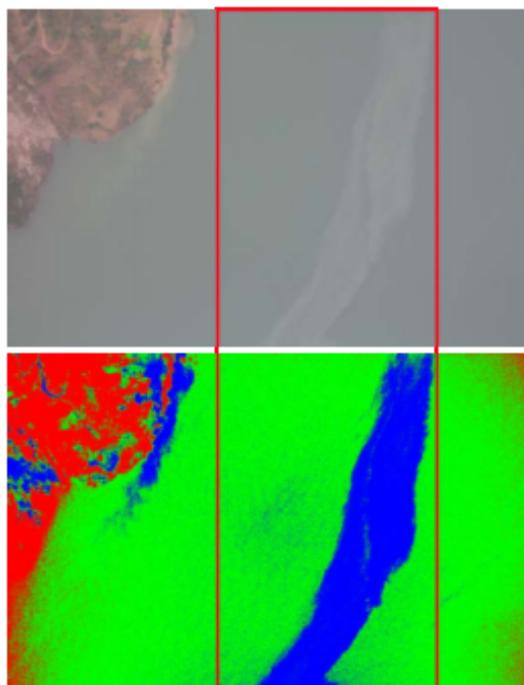


Figura 6 – A poluição de óleo identificada por uma câmera em VANT. Para obter o tamanho da área contaminada, foi usado o algoritmo K-means para classificar a imagem ([ZANG et al., 2012](#)).

2.3 Discussão dos trabalhos relacionados

Observando os trabalhos relacionados, verifica-se que análises de qualidade do ar com sensores têm sido implementados, contudo os estudos apresentados possuem lacunas. O trabalho de Wen et al. (2013), que implementa uma análise de qualidade de ar em função do tempo em local fixo, apresenta carência no referencial de calibração. Seguido pelo trabalho de Devarakonda et al. (2013), que apresenta um protótipo móvel de análise de qualidade de ar, entretanto o estudo não foi realizado em um centro urbano. Faiçal et al. (2014) implementaram uma arquitetura de autoajuste de rota de VANT para pulverização de produtos químicos, todavia a validação da arquitetura foi em ambiente simulado. Por

estas razões, este trabalho implementa um estudo de caso em campo com dados reais, com coletas em ambiente urbano e movimentado, os quais envolvem o dispositivo de *hardware* e *software* para coleta de CO, variáveis climáticas e análises com esses dados. Este estudo tem como base parte dos seguintes trabalhos: ([WEN et al., 2013](#)): análise em local fixo, observando fluxo de carros. ([DEVARAKONDA et al., 2013](#)) protótipo móvel de análise de qualidade de ar. Com o diferencial das coletas terem sido feitas no centro da cidade, comparando exposição ao CO em dois meios de transporte diferentes. ([FAIÇAL et al., 2014](#)) implementação de coleta de dados com VANT, usando protótipo real.

3 Metodologia

Para se atender o escopo deste trabalho que é (i) o desenvolvimento e avaliação de um dispositivo de *hardware* e *software* para coleta de CO e variáveis climáticas e (ii) sua aplicação em três estudos de caso, foi implementado um protótipo de baixo custo e metodologias de coletas, ambos descritos a seguir.

3.1 Protótipo

Nesta Seção será descrito o dispositivo sensorial para coleta de poluentes e variáveis ambientais (Figura 7). Este consiste de um Arduino UNO (Subseção 3.1.1), dois possíveis sensores de monóxido de carbono (Subseções 3.1.2 e 3.1.3), um sensor de umidade e temperatura (Subseção 3.1.4), um sensor de pressão (Subseção 3.1.5), um *shield* SD, um *timer* para consultar o relógio, e o *software* para controle e leitura de dados. Este protótipo custou aproximadamente R\$ 180,00.

3.1.1 Arduino

Arduino é um plataforma de *hardware* aberta que pode trabalhar com vários sensores e tecnologias de comunicação. Uma placa de Arduino consiste de um microcontrolador ATmega328 que permite carregar novos códigos sem dificuldades e componentes complementares para prover facilidades de programação e incorporação em outros circuitos (ARDUINO, 2015b). A maioria das placas incluem um regulador linear de 5 volts e uma velocidade de relógio de 16 MHz. Possui 14 pinos digitais de entrada e saída, 6 entradas analógicas, uma conexão USB usada para comunicar com um computador. A voltagem de entrada recomendada é entre 7 V até 12 V, devido ao 5 V possivelmente suprir menos de 5 volts e a placa assim pode ficar instável. Se provido mais de 12 V, o regulador superaquece, causando dano aos *hardware*. Ele possui uma memória flash de 32 KB com 0.5 KB usado para o *bootloader*, SRAM de 2 KB e um EEPROM de 1 KB (ARDUINO, 2015a).

Foi escolhido o Arduino por ser: (i) um *hardware* livre que possui uma ampla comunidade de desenvolvedores, (ii) sua linguagem de programação uma grande quantidade de bibliotecas e (iii) a grande quantidade de pinos de entrada e saída do Arduino facilita a adição de novos sensores para coletar dados de acordo com a necessidade. Por este motivo o Arduino é conhecido como uma plataforma de prototipagem rápida.

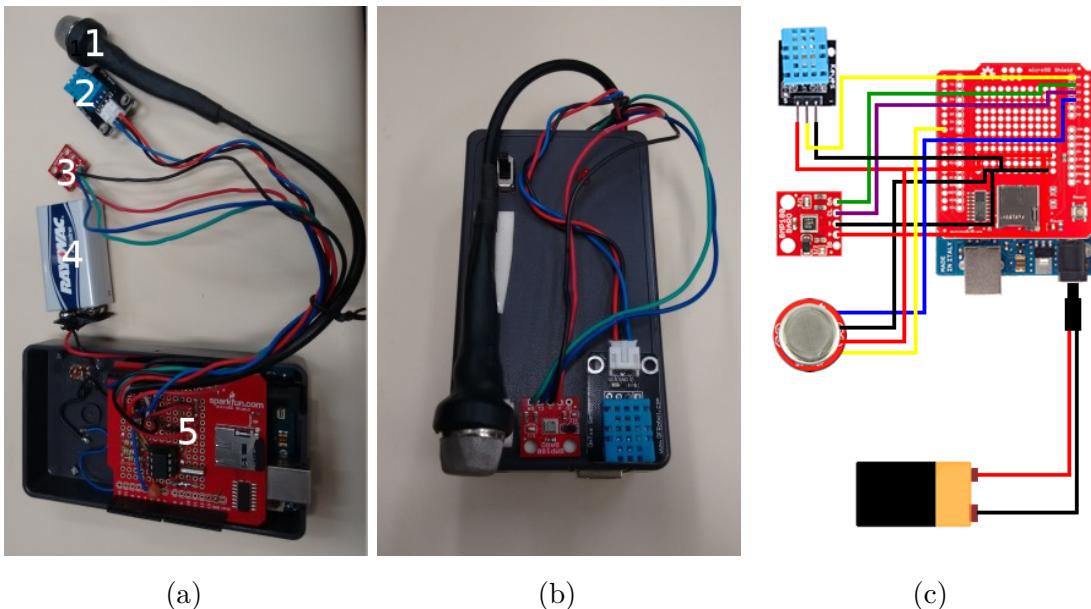


Figura 7 – (a) Protótipo de coleta de CO: (1) detector de CO MQ-2, (2) sensor de temperatura e umidade DHT11, (3) barômetro BMP180, (4) bateria 9v e (5) Arduino Uno, DS1307 e cristal 32.768 usados para o relógio do Arduino e SD-card. (b) protótipo empacotado. (c) esquema de circuito do protótipo.

3.1.2 Sensor de CO MQ-2

O sensor MQ-2 (Figura 8a) tem um grande escopo de detecção de gases, rápida resposta e alta sensibilidade, vida longa e estável e um circuito simples. É usado para detecção de gases para ambientes domiciliares e industriais e detecta gás liquefeito de petróleo (LPG), butano, propano, metano, álcool, hidrogênio e fumaça. O sensor de gás MQ-2 é composto por um micro tubo cerâmico de óxido de alumínio (Al_2O_3), a camada sensitiva de dióxido de estanho (SnO_2), eletrodo de medição e um aquecedor (ELECTRONICS, 2014a).

Para a pseudo calibração do MQ-2 (via *software*) foi aplicado um resistor de carga (RL) 4.7Kohms, onde a resistência do sensor (RS) e o resistor de carga (RL) formam um divisor de tensão. A voltagem de saída pode ser interpretada pelo Arduino via conversor analógico-digital¹. Dado um valor de RL, tensão de alimentação e voltagem de saída, RS pode ser obtido. Baseado no gráfico de curva de sensibilidade provido pelo *datasheet* do MQ-2 (Figura 9), RS no ar limpo sob uma dada temperatura e umidade é constante, que é a resistência inicial do sensor que é o RO. O trabalho principal da pseudo calibração é calcular o RO, por amostragem e média das leituras quando o sensor é colocado em um ar limpo. Uma vez que o RO é obtido, a concentração do gás alvo pode ser calculada usando a relação RS/RO como entrada. O *software* foi estendido o código de exemplo da

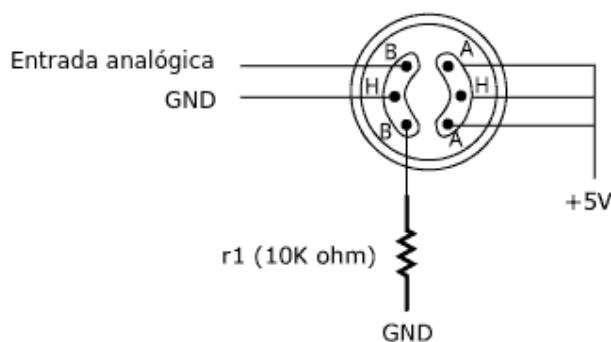
¹ Um conversor analógico digital (ADC) é um dispositivo que converte uma quantidade física contínua (geralmente voltagem) para um número digital que representa uma quantidade.

empresa Sandbox Electronics (2014). Uma calibração mais apurada deve ser feita, não é recomendado o uso deste mecanismo (MQ-2 e calibração via *software*) para salvar vidas.



(a)

(b)



(c)

Figura 8 – (a) Sensor MQ-2 usado para detectar LPG, butano, propano, metano, álcool, hidrogênio e fumaça. (b) Sensor de CO MQ-7. (c) Cabeamento de ambos sensores.

3.1.3 Sensor de CO MQ-7

O sensor MQ-7 (Figura 8b) possui alta sensitividade ao monóxido de carbono com vida longa e estável. Usável para detecção de CO em ambientes domiciliares e industriais ou em automóveis. Diferente do sensor MQ-2, possui um ciclo de leitura, que consiste de 60 s aquecendo a 5 v e 90 s de leitura a 1.4 v, como demonstra a Figura 10, este ciclo existe para prolongar a vida do sensor por até 5 anos. O cabeamento do sensor MQ-7 é o mesmo do MQ-2, mostrado na Figura 8c.

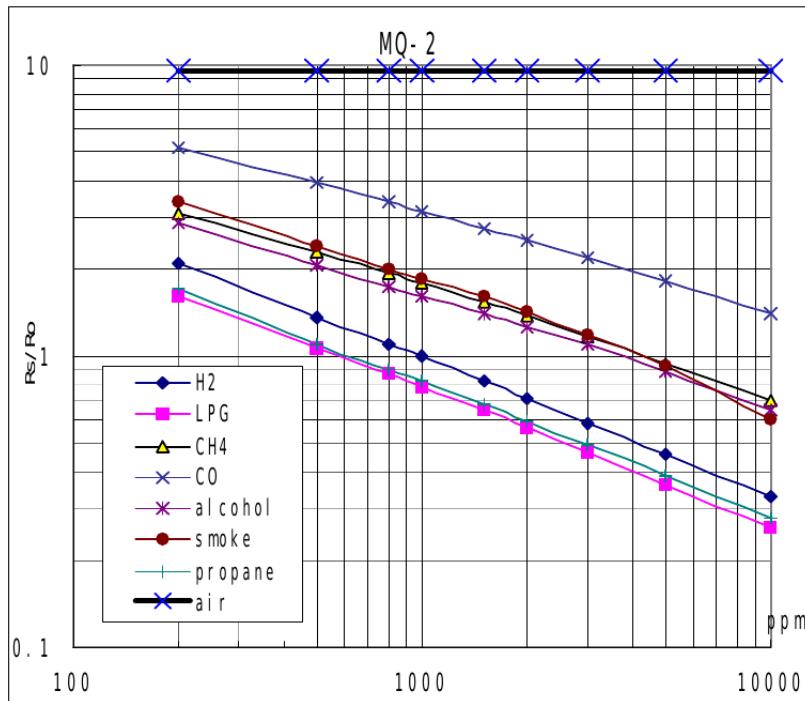


Figura 9 – Curva de sensibilidade de MQ-2 para os gases sob as condições de: temperatura 20 °C, umidade 65 %, concentração de O₂ de 21 % e RL de 5 Ω, nota-se que RS/RO é constante para o ar nas dadas condições (ELECTRONICS, 2014a).

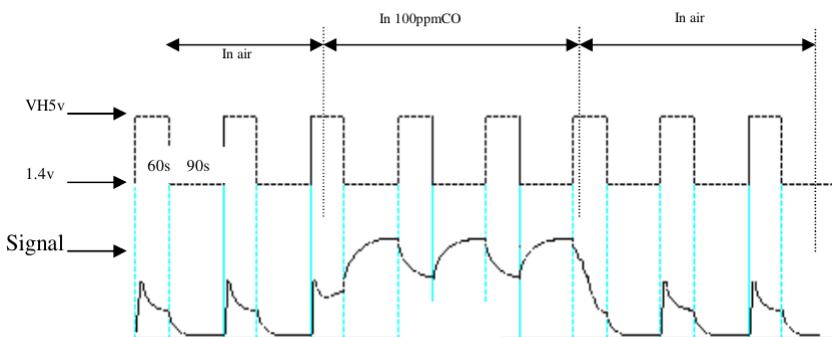


Figura 10 – Sinal quando o sensor é mudado de um ar limpo para um recipiente com 100 ppm de CO. O ciclo de aquecimento do sensor MQ-7 dura 2.5 min (ELECTRONICS, 2014b).

3.1.4 Sensor de temperatura e umidade DHT11

De acordo com o fabricante Drobotics (2010), o sensor DHT11 implementa o sensoriamento de temperatura e umidade com saída digital calibrada, garantindo assim, uma alta confiabilidade e uma excelente estabilidade de longa duração. Este sensor possui um componente de medição de umidade do tipo resistivo e um componente de medição de temperatura NTC (coeficiente negativo de temperatura, em que a resistência elétrica diminui a medida que se eleva a temperatura). Conecta-se a um microcontrolador de 8

bits, oferecendo uma alta qualidade, taxa de leitura por segundo, anti-interferência e bom custo-benefício. O sensor é exposto na Figura 11

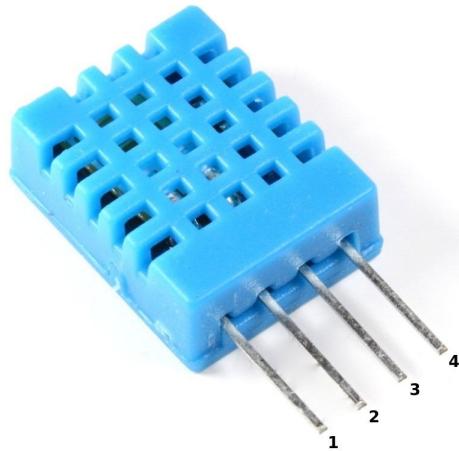


Figura 11 – Sensor de umidade DHT11. Onde (1) VCC, (2) dados, (3) não conectado, e (4) terra

3.1.5 Sensor de pressão barométrica BMP180

De acordo com o fabricante Bosh (2009), o sensor de pressão BMP180 (Figura 12) possui consumo ultra baixo de energia, ideal para telefones móveis, PDAs, navegação GPS (sistema de posicionamento global) e equipamento externo. Com um baixo ruído de 0.25 m numa conversão rápida, resolução de até 12 leituras por segundo, o sensor BMP180 oferece uma grande performance, e já vem equipado com um sensor de temperatura. As aplicações recomendadas do sensor são: monitoramento de clima e indicação de movimento vertical.

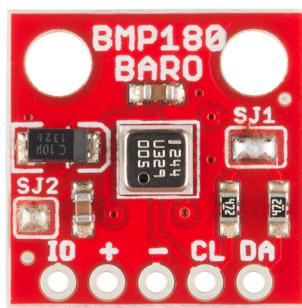


Figura 12 – Sensor de pressão e temperatura BMP180.

3.1.6 Integração com o VANT

Em colaboração com o Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (ICMC-USP), o dispositivo sensorial foi acoplado ao VANT (Figura

13), objetivando implementar dois modelos de coleta: (i) zigue-zague e (ii) subida/descida. O modelo de coleta em zigue-zague consiste de um vôo em forma de zigue-zague em uma altura fixa a fim de cobrir uma determinada área. O modelo subida/descida consiste de subir ou descer e parar periodicamente para coleta de dados.

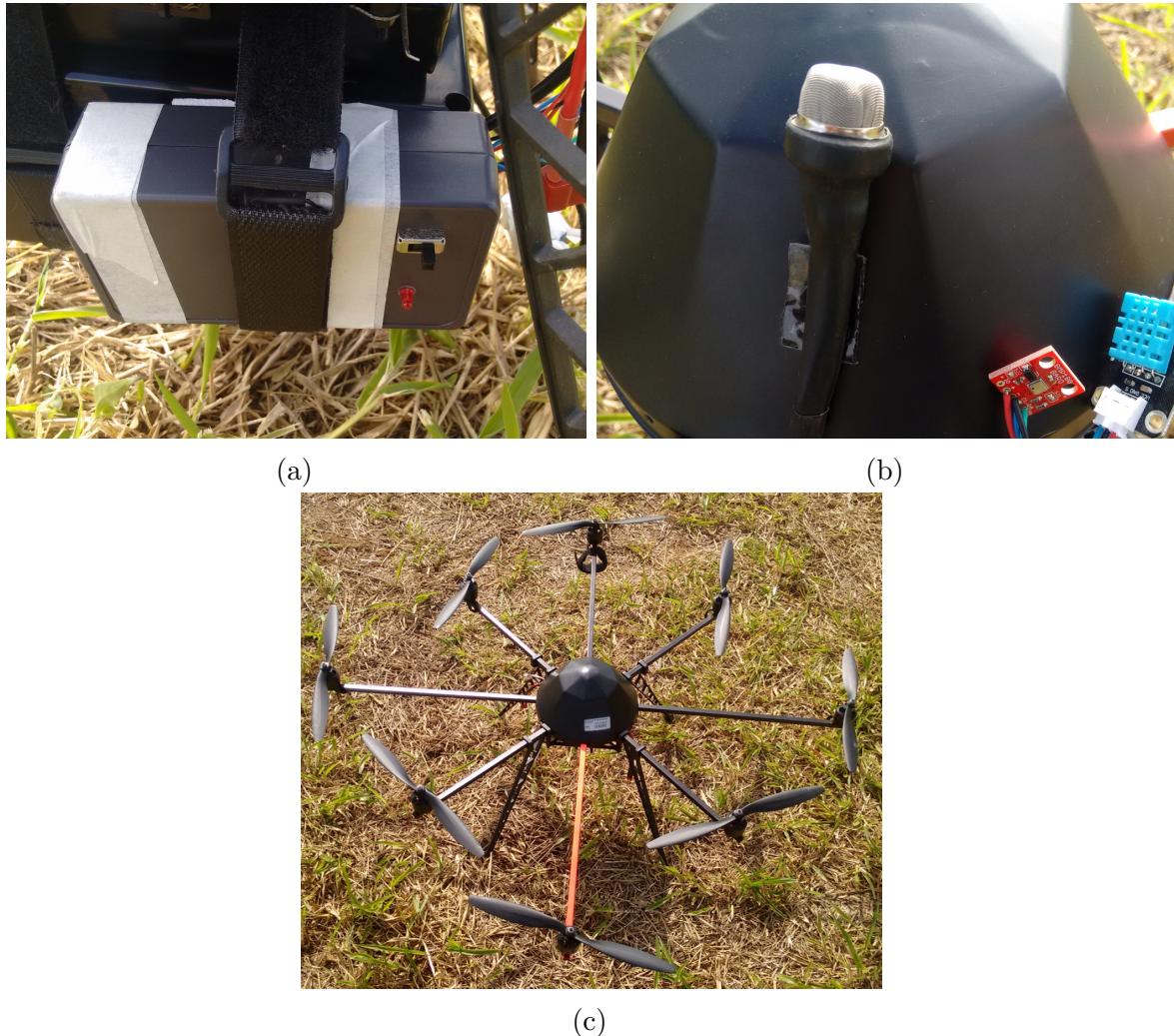


Figura 13 – (a) O controlador Arduino em uma caixa de proteção. (b) Sensores MQ-2, BMP180 e DHT11. (c) VANT MikroKopter Okto, com oito hélices classe III.

A Figura 14 mostra o VANT MikroKopter Hexa² com vista de frente. Entre os trens de pouso, nota-se o módulo UAV *Brain* destacado, que foi o mesmo usado neste trabalho, o módulo UAV *Brain* é o módulo computacional do VANT (VIEIRA, 2015). A Figura 15 expõe detalhes de implementação do protótipo UAV *Brain*. O ZigBee, das Figuras 15a-i e 15a-ii, é responsável pela comunicação sem fio no trabalho de (VIEIRA, 2015). O Arduino, em conjunto com a Power Meter Shield (Figuras 15b-ii e 15biv respectivamente), atuam no monitoramento do consumo de energia elétrica do ZigBee. Há um sensor DHT22 de temperatura e umidade para registro de dados climáticos 15c-v. O Raspberry Pi, exposto

² O VANT utilizado neste trabalho foi disponibilizado pelo professor Doutor Jó Ueyama, do ICMC-USP. Foi utilizado durante a visita técnica à USP entre 15/06 até 04/07 de 2015.

na Figura 15b-iii, é o núcleo do agente computacional UAV *Brain*, ao qual são delegadas as funções computacionais do VANT, como registro de logs em csv (arquivo separado por vírgulas).



Figura 14 – MikroKopter Hexa, usado no trabalho de Vieira (2015), este equipado com o módulo UAV *Brain* destacado entre os trens de pouso.

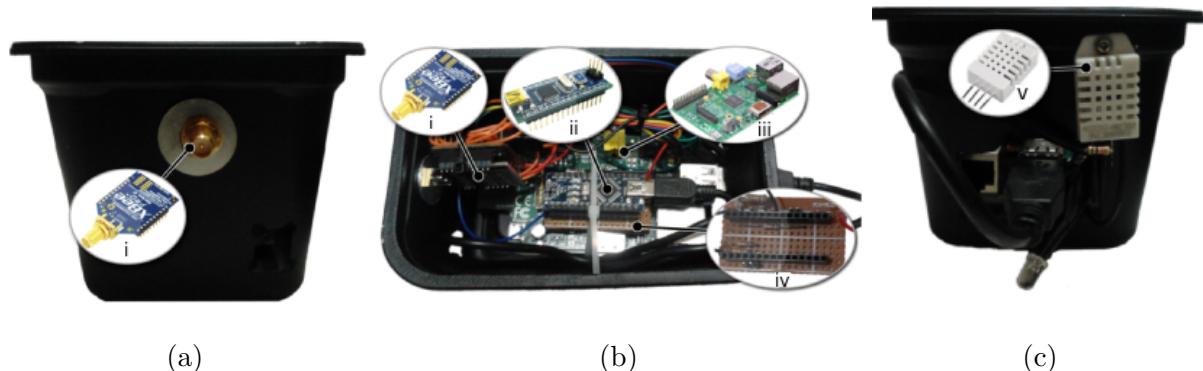


Figura 15 – (a) vista frontal, (b) vista superior, (c) vista traseira, i) rádio transceptor ZigBee, ii) Arduino Nano, iii) Raspberry Pi, iv) power meter shield, v) sensor de umidade e temperatura (VIEIRA, 2015).

3.2 Metodologia de coleta e análise em localização fixa

Para este método de coleta, têm-se dois possíveis sensores de poluentes atmosféricos (MQ-2 e MQ-7), dois para temperatura e um para umidade, sendo o MQ-7 específico para CO, porém este não é calibrado, em razão disso, são realizadas análises relativas com normalização dos dados. O MQ-2 possui um esquema de calibração via *software*, reage a vários gases, o que pode ser uma vantagem pela flexibilidade e uma desvantagem pela interferência de outros gases na sua leitura.

Para monitoramento de CO, usa-se o MQ-7, pois o mesmo é mais sensível a este gás em relação ao MQ-2, o MQ-7 possui um ciclo de leitura de 2,5 min, no qual 90 s são dedicados à leitura e 60 s ao aquecimento. O *software* do dispositivo sensorial de coleta salva no cartão de memória a média de todas as leituras feitas dos sensores a cada ciclo de 2,5 min, como o dia possui exatos 1140 min são armazenados no cartão de memória 576 registros de CO diários no formato csv. As leituras podem ser feitas em ambiente fechado ou aberto, sendo, por exemplo, dentro ou fora de casa. Em função dos dados coletados, foram criados *scripts* para analisá-los em função de períodos específicos de tempo. As análises se dão em função das médias e desvio parão ao longo dos dias ou ao longo das horas.

3.3 Metodologia de coleta e análise em diferentes meios de locomoção

Como o dispositivo sensorial (Figura 7) é portátil, possuindo 62 mm largura, 112 mm comprimento, 35 mm altura e pesando 134 g, este pode ser acoplado em diferentes meios de transporte, ou mesmo usado como um dispositivo sensorial pessoal para monitoração de poluentes atmosféricos e/ou variáveis climáticas.

O dispositivo não possui GPS para fazer rastreamento de dados ao longo de um percurso, contudo, foi utilizado um aplicativo para *smartphone* com sistema operacional Android chamado GPSTracker³ para suprir essa carência. Como os *smartphones*, com esse sistema, tornaram-se comuns, não entendemos como problema ter acesso a um. Recomenda-se usar o sensor abrigado de luz direta do sol e de chuva, necessitando de circulação livre de ar, pois, estes fatores impactam na leituras dos sensores do dispositivo sensorial. Após a coleta usa-se um mecanismo de sincronização de relógio entre o dispositivo sensorial e um *smartphone* para que se tenha acesso aos dados de sensores e hora (provenientes do dispositivo sensorial) e posição (proveniente do aplicativo GPSTracker). As análises se dão a partir de geração de mapas de calor com dados normalizados. A partir disso, é possível identificar focos de poluição ao longo de um percurso.

3.4 Metodologia de coleta e análise empregada em plataforma móvel (VANT)

Foram elaborados dois planos de voo: (i) zigue-zague e (ii) variação de altura, onde as diretrizes de voo foram feitas no *software* de controle do VANT desenvolvido e proposto por Vieira (2015). Foi verificado por Roldán et al. (2015) que o melhor lugar

³ Desenvolvidos pelos colegas do laboratório de computação do ITV-DS, Bruno Ferreira e Mylena Reis.

para a localização dos sensores, que sofrem com a influência de vento, é no topo do centro do VANT. Assim, é indicado que sensores de gases, temperatura e umidade fiquem nesta posição. Os sensores de temperatura e umidade devem ficar afastados de fontes de calor, como o sensor de CO que aquece mostrado na Figura 13b. Após a coleta, faz-se uma mesclagem dos dados do dispositivo sensorial (CO, temperatura, umidade, altura e hora) e do VANT (posição GPS, altura, velocidade, hora etc.), ambos em formato csv. Com a execução dos planos de voo são feitas análises de variação de dados coletados dos sensores. Com o voo em zigue-zague, pode-se interpolar os pontos a fim de determinar a concentração de algum poluente em uma determinada área e, a partir disto, encontrar focos de poluição. Com o voo de variação de altura, pode-se determinar a concentração de poluentes ou dados atmosféricos em função da altura. Os planos de voo podem ser usados de forma complementar, descobrindo uma determinada altura onde os poluentes se concentram (plano de voo com variação de altura) e a partir desta, realizar um voo de reconhecimento em dada altura com o plano de voo em zigue-zague.

3.5 Considerações Finais

Para atender o escopo deste trabalho, foi criado um dispositivo sensorial e as metodologias de coleta. Os sensores de CO MQ-2 e MQ-7 possuem propriedades diferentes, o MQ-2 é mais abrangente (reage a mais gases), porém menos preciso que o MQ-7 em relação às medições de CO. O sensor de temperatura e umidade DHT11 é interessante para leituras em locais fixos por sua taxa de leitura ser adequada para este tipo de coleta, contudo, este não é adequado para detectar mudanças grandes de temperatura em um curto espaço de tempo. O sensor de pressão e temperatura BMP180 mostra-se adequado para identificar variações de altura e também temperatura, verificou-se que este é mais adequado que o sensor DHT11 para coleta de temperatura. Mostrou-se neste Capítulo as capacidades e limitações de cada sensor que foram usados nos protótipos de análise de ar e também as metodologias de coleta, nota-se que cada metodologia de coleta é adequada para um contexto específico, o Capítulo a seguir irá expor estudos de caso com o uso destas metodologias.

4 Experimentos e Resultados

A fim de verificar a validade do modelo proposto, foram implementados quatro perfis de coleta, (i) em localização fixa, (ii) móvel (a pé e de ônibus), (iii) zigue-zague e (iv) subida/descida. As coletas (i) e (ii) foram praticadas em Belém do Pará, no bairro Umarizal. As coletas (iii) e (iv) foram feitas no Campus 2 da USP de São Carlos. Não foi possível calibrar os sensores, assim, os dados brutos dos sensores de CO são normalizados para indicar a variação do CO ao longo do tempo.

4.1 Coleta em localização fixa

Esta coleta foi feita com o uso do protótipo de análise de qualidade de ar, aplicado em local fixo (Figura 16), do dia 30/11/2015 ao dia 13/12/2015, a coleta foi realizada no centro de Belém, bairro Umarizal. Nesta localização, esquina movimentada do bairro, transitam 5 (cinco) linhas de ônibus e constante fluxo de carros. Foram feitas duas análises: (i) variação de CO em função das horas e (ii) variação de CO em função dos dias. A Figura 17 exibe as variações de CO ao longo de 14 dias, as variações de acordo com as horas estão expostas na Figura 18

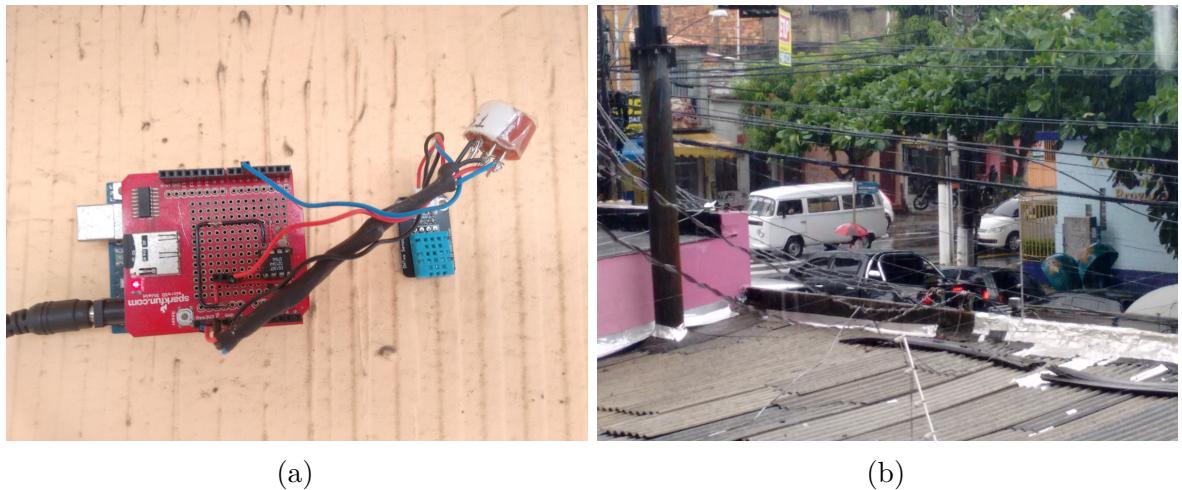


Figura 16 – (a) Protótipo de coleta de CO e variáveis climáticas. (b) Distância do protótipo em relação a uma esquina de duas ruas movimentadas no centro de Belém do Pará.

A área de coleta está inserida em uma região predominantemente comercial, onde, em geral o fluxo de veículos obedece aos padrões de horário do comércio. Nas duas análises a seguir, verificou-se que a concentração de CO está diretamente ligada aos padrões de horário do comércio local.

Foi analisado o comportamento de concentração de CO ao longo dos dias, em que são destacados os dias da semana em azul, os finais de semana em verde e o feriado¹ em laranja (Figura 17). Observou-se, assim, os seguintes comportamentos:

- Dias de semana: as médias e variâncias tendem a ser maiores em relação aos finais de semana e feriados.
- Finais de semana: médias e desvios padrão menores em relação aos dias da semana.
- Feriado: houve pouco movimento na cidade, apresentando a menor média e desvios padrão em relação aos outros dias analisados.

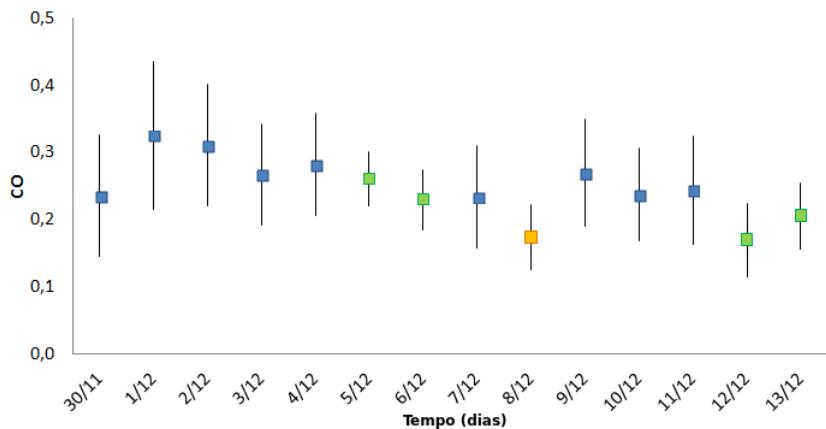


Figura 17 – Variação de monóxido de carbono em local fixo e ar livre ao longo dos dias. O eixo x é referente às datas e o eixo y significa a concentração de CO. Onde os pontos azuis são as médias, o tamanho dos traços são as suas respectivas variâncias, o pontos verdes são finais de semana, e o laranja foi feriado no município de Belém do Pará. Nota-se um desvio e média menores durante os fins de semana. Destaca-se o feriado que apresentou a menor concentração de CO, devido a redução do fluxo de veículos neste dia.

Observando as diferenças de concentrações de CO ao longo das horas de duas semanas (Figura 18), as leituras foram separadas em três categorias: (i) dias de semana, (ii) sábado e (iii) domingo. Observou-se os seguintes comportamentos:

- Dias de semana: pico das 7:00 às 8:00, devido à chegada das pessoas aos seus destinos, em dias de expedientes normais. Das 17:00 às 19:00 volta das pessoas para suas casas, horário típico de tráfego intensificado.
- Sábados: pico das 7:00 às 8:00, pois há expediente normalmente até 12:00 em vários pontos comerciais. Observou-se que a quantidade de CO aumenta a partir das 18:00, deve-se ao fluxo de pessoas em direção a eventos noturnos. Em suma, o

¹ Feriado municipal em Belém. Nossa Senhora da Conceição (08/12/2015).

comportamento de CO nos sábados se assemelha muito com o fluxo dos dias de semana até as 12:00.

- Domingos: das 0:00 as 9:00 apresentaram concentração praticamente constante de CO, devido ao pouco movimento.

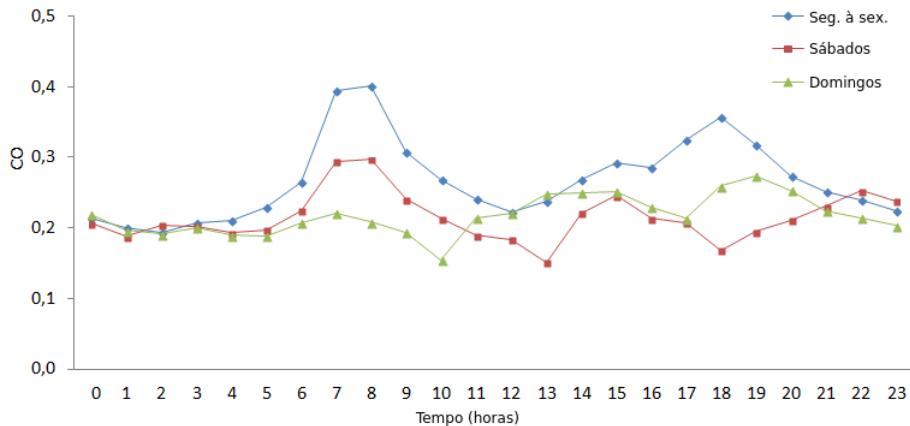


Figura 18 – Variação de CO ao longo das horas do dia. Foram utilizados os dados da coleta em ambiente fixo e aberto. Durante os dias de semana principalmente, nota-se uma grande variação de CO entre as 7:00 às 9:00 e outro pico entre as 17:00 até as 19:00

Observa-se que, para evitar maiores contatos com CO, os melhores horários para locomoção são: das 00:00 às 06:00, das 11:00 às 13:00 e das 21:00 às 23:00. Porém, os dias úteis da semana das 07:00 às 08:00 e das 17:00 às 19:00 devem ser evitados. É interessante perceber que o sábado das 00:00 ao 16:00 apresenta um comportamento similar a um dia de semana, com diferença do crescimento da concentração de CO a partir das 18:00. Nota-se, também, que o domingo à tarde apresenta mais CO que o sábado à tarde.

4.2 Coleta móvel: análise de CO em diferentes meios de transporte

Esta coleta, com o uso do protótipo desenvolvido nessa dissertação é exposta na Figura 19. Foi aplicada em dois meios de transporte: ônibus (Figura 19a) e a pé (Figura 19b) por três dias seguidos: quinta-feira (17/12/2015), sexta-feira (18/12/2015) e sábado (19/12/2015). O horário de todas as coletas foi entre 8:00 e 9:00 da manhã, período de tráfego mais intenso (como foi observado na coleta feita por duas semanas na Seção 4.1), seguindo o mesmo trajeto de 1.82 km com início numa esquina movimentada do bairro Umarizal em direção a uma área comercial de Belém, sabe-se que o clima interfere na leitura do sensor MQ7 usado na coleta (ELECTRONICS, 2014b), por este motivo as seis coletas foram feitas na mesma condição meteorológica e horário. Verifica-se na Tabela 2 um sumário das seis coletas, onde ao comparar-se a quantidade de exposição ao CO no ônibus e a pé, verifica-se que a quantidade de CO é maior dentro do ônibus. A Figura 20,

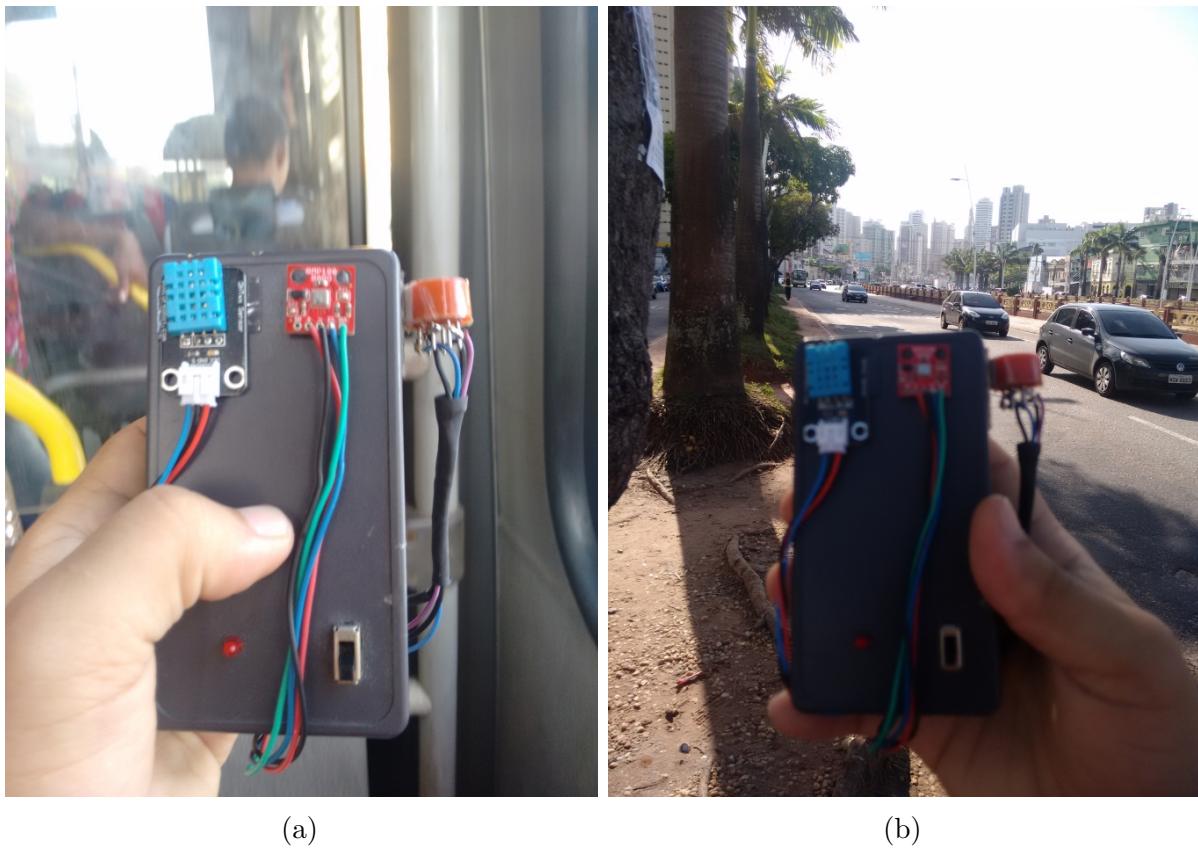


Figura 19 – Protótipo de computação vestível onde (a) é coleta dentro de ônibus próximo à janela e (b) coleta a pé. Em ambos os casos o protótipo foi carregado na altura do peito do usuário.

Tabela 2 – Dados normalizados das seis coletas realizadas com o protótipo de computação vestível. Nota-se que a média de monóxido de carbono apresentou-se menor a pé, indicando que a exposição ao CO é maior no ônibus. Concentração > 0.5 indica uma quantidade de leituras acima de 0.5

Coleta	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	Concentração > 0.5
Quinta pé	0.42	0.14	1.00	0.07	20.65%
Quinta ônibus	0.50	0.16	0.81	0.03	60,46%
Sexta pé	0.10	0.07	0.55	0.00	0,16%
Sexta ônibus	0.22	0.10	0.37	0.03	0.00%
Sábado pé	0.18	0.10	0.77	0.07	1,17%
Sábado ônibus	0.31	0.08	0.51	0.14	6,30%

expõe um sumário visual da coleta em forma de *heatmap*. Abaixo, uma discussão sobre os dados coletados.



Figura 20 – *Heatmap* de concentração de monóxido de carbono. Coletas feitas em ônibus (a, c, e) e a pé (b, d, f) por um percurso de 1,82 km. Os dados são normalizados. Em destaque nas figuras (a), (c) e (e), uma maior concentração de CO, apesar do fluxo de veículos ser grande ao longo do percurso, as ruas apresentam diferença grande de largura, o que implica na circulação de ar e, uma menor quantidade de CO por consequência. Em destaque nas figuras (b) e (f), observa-se uma maior concentração de CO devido a uma interseção entre três ruas movimentadas, na coleta de sexta a pé (d) não houveram muitas variações, pois, foi o dia de menor movimento.

Observando o sumário das leituras presente na Tabela 2, notou-se uma exposição maior ao CO dentro do ônibus, quando comparado dia a dia. Percebe-se claramente que há grandes variações de monóxido de carbono ao longo do percurso, onde vários fatores interferem na concentração de CO que um determinado trecho pode apresentar, são alguns deles: os automóveis que emitem a maior parte de CO, os sinais de trânsito que geram



Figura 21 – (a) Rua Antônio Barreto 10 m de largura, densidade de prédios. (b) Região conhecida como Doca, com 54 m de largura, maior circulação de ar em relação a (a).

aglomerados de carros em um trecho de uma rua, as interseções das ruas movimentadas, circulação de ar, feriados, dias festivos, clima, dentre outras situações. Nas coletas feitas em ônibus pelas manhãs (Figuras 20a, 20c e 20e), nota-se uma concentração maior de CO nas áreas destacadas; o fluxo de carro é grande ao longo de todo percurso analisado, contudo, as ruas possuem diferentes larguras como mostra a Figura 21, o que pode significar uma maior circulação de ar e auxilia em manter uma menor concentração de CO.

Embora mais experimentos sejam necessários, os atuais resultados mostram que, para evitar maiores contatos com CO, deve-se desviar-se de ruas estreitas e movimentadas, principalmente em horários de pico (como dito na Seção 4.1) e onde há interseção de ruas, como mostrado nas Figuras 20b e 20f. Notou-se que a exposição ao CO foi maior dentro do ônibus em relação a coleta a pé, a coleta a pé foi realizada na calçada, enquanto a coleta do ônibus foi realizada dentro dele.

4.3 Coleta com VANT em zigue-zague e variação de altura

Estas coletas foram realizadas usando o dispositivo desenvolvido nessa dissertação acoplado ao VANT fornecido pelos colegas do laboratório de rede de sensores do ICMC-USP. Foram implementados dois modelos de coleta: (i) em zigue-zague Figura 22 e (ii) com variação de altura Figura 23. Nestas coletas, as variações de CO foram mínimas devido ao local de coleta que foi afastado do centro urbano, pois o VANT representa risco à segurança das pessoas. Desta forma, foram analisados os dados de temperatura com o sensor BMP180, pois houveram variações de temperatura ao longo do voo, a taxa de leitura é 12 Hz, a velocidade média de 3 m/s. O sensor BMP180 registrou na média 4 leituras a cada metro percorrido. Abaixo uma discussão sobre os dados coletados.

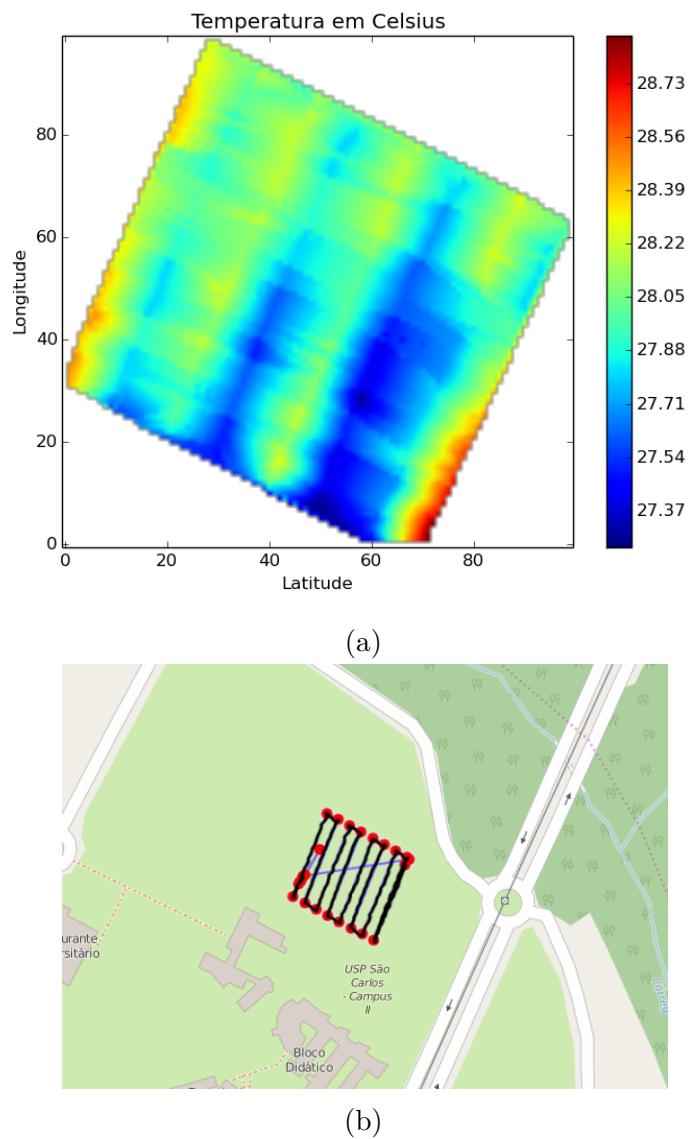


Figura 22 – (a) Mapa de concentração de temperatura com o sensor BMP180. (b) Conjunto de *waypoints* usados pelo VANT e a área onde foi realizada a coleta, USP-São Carlos campus 2.

A coleta (i) zigue-zague (Figura 22), foi implementada numa altura fixa de 25 m para cobrir uma área de $1600\ m^2$ com um total de 4159 leituras, percorrendo 1039 m em 5.77 min, foram desconsiderados os dados coletados durante a subida e descida. Foi aplicado um método de interpolação linear nos dados, resultando no gráfico da Figura 22a, onde notam-se as concentrações de temperatura. Esse método de coleta e análise pode ser aplicado em vários tipos de ambientes abertos, como em vulcões no trabalho de Caltabiano et al. (2005), em cidades para análise de poluentes, em florestas pra indicar focos de incêndio, próximo a usinas nucleares para medir radioatividade, etc. Foi implementado um algoritmo de interpolação linear, especificamente o método `LinearNDInterpolator()`² do pacote `scipy`³ da linguagem Python. A partir deste método de interpolação, a coleta realizada com o VANT pode indicar os focos de poluição para, então, realizar mapas mais detalhados de áreas específicas. A interpolação é construída por triangular os dados de entrada (localização de coleta com o valor do dado coletado pelo VANT) com `Qhull`⁴ e, em cada triângulo realiza uma interpolação baricêntrica linear.

A coleta (ii) com variação de altura (Figura 23) foi realizada com uma variação de 5 m a 40 m de altura num total de 2417 leituras em 3.3 min, onde a cada 10 m houve uma parada de 30 s para coletar dados de temperatura. O eixo x é referente ao desvio do VANT na latitude em relação ao seu ponto inicial, o eixo y é a altura. Nesta coleta foi usado o sensor de pressão BMP180, para coletar a medida de altura ao longo do voo e o mesmo sensor para coleta de temperatura. Percebe-se que a concentração de temperatura mostrou-se maior na altura de 40 m, também que a variação em torno do eixo x foi maior, devido ao vento ser mais forte de acordo com a altura. Mais investigações são necessárias para saber se a temperatura é, de fato, maior em altitudes maiores. Com este modelo de coleta é possível ter uma alternativa aos balões meteorológicos.

² <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.LinearNDInterpolator.html>

³ <http://scipy.org>

⁴ <http://www.qhull.org/>



Figura 23 – Dados de temperatura considerando a variação de altura. A cor dos pontos indicam a temperatura num dado ponto de coleta. O eixo x é a variação do VANT em relação ao seu ponto inicial na latitude, o eixo y diz respeito a altura. Pode-se observar que a concentração de temperatura mostrou-se maior na altura de 40 m, também que a variação em torno do eixo x foi maior devido ao vento ser mais forte de acordo com a altura.

5 Considerações finais e trabalhos futuros

Neste estudo foi proposta a criação de um dispositivo sensorial de análise de qualidade de ar. Para entender as variações de poluentes em diferentes contextos, principalmente urbano, foram implementados três métodos de leitura e análise de poluentes: (i) de leitura em lugar fixo (análise em contexto local de exposição a poluentes), (ii) leitura móvel comparando concentração de CO em dois meios de locomoção (possibilita encontrar focos de poluição em movimento) e, (iii) acoplando o protótipo a um VANT (análise em voo, elimina a interferência de obstáculos). Como foi dito no Capítulo 1, na região norte ainda não existe algum monitoramento de qualidade de ar. Mesmo onde há monitoramento, como pode-se ver nos relatório da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2014), são feitas análises a nível de cidade/bairro e não a nível local em um dado contexto. Comparando com a abordagem tradicional aplicada por estas agências ambientais oficiais, o presente trabalho mostrou a capacidade de monitorar os poluentes de forma mais detalhada. As variações de CO foram diferenciadas de acordo com as horas entre dias úteis e finais de semana, onde foi verificado que a concentração de CO está relacionada com o maior movimento de pessoas nos seus meios de transporte. Com um sensor calibrado, seria possível indicar através deste monitoramento quais os potenciais riscos aos seres humanos em relação à exposição ao monóxido de carbono.

5.1 Trabalhos Futuros

Diversas outras atividades ainda são previstas. Entre elas, a calibração dos sensores, a integração com GPS, análises em tempo real, a aquisição de outros sensores de poluição, além de CO. Como visto, diversos são os pontos em abertos neste tipo de pesquisa. Em termos de inovação científica, existe um vasto campo a ser explorado na área, tanto em desenvolvimento de *hardware* como no desenvolvimento de *software* ou mesmo uma plataforma colaborativa entre sensores fornecendo informações ambientais. Em termos de monitoramento ambiental, a pesquisa pode ter um desdobramento mais específico de acordo com a inclusão de interessados, como por exemplo, o monitoramento de demais poluentes, análises de poluentes em linhas de ônibus simultâneas, ou mesmo um VANT que mapeia e encontra automaticamente focos de poluição poluição.

5.2 Artigos e conquistas

Esta seção traz a produção acadêmica obtida pelo autor e colaboradores deste trabalho ao longo do programa de Mestrado.

5.2.1 Um veículo aéreo não tripulado para encontrar focos de poluição

Artigo¹ publicado no Seminário Integrado de Software e Hardware (SEMISH) 2016. Neste foi apresentada uma integração entre um VANT e o protótipo de coleta e análise de poluentes e variáveis climáticas. Os resultados mostraram uma integração bem sucedida (apresentada na seção 3.4 e 4.3) com o mapeamento de temperatura usando dos métodos de coleta zigue-zague (i) e variação de altura (ii).

5.2.2 Entendendo padrões de poluição com ferramentas de hardware e software livres

Palestra² aceita no Fórum Internacional de Software Livre (FISL) 2016, na trilha de ecossistema, cultura, filosofia, e política. Apresentada em 15/07/2016.

¹ https://github.com/marcelomaia/ArduinoAirQuality/blob/master/docs/papers/semish_2016.pdf

² <https://github.com/marcelomaia/ArduinoAirQuality/blob/master/docs/presentations/FISL17.odp>

Referências

- ALONSO, C. D.; GODINHO, R. A evolução da qualidade do ar em cubatão. *Química Nova*, v. 15, n. 02, 1992.
- ARDUINO. *Technical specs*. 2015. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>.
- ARDUINO. *What is Arduino?* 2015. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>.
- BALES, E. et al. Citisense : Mobile Air Quality Sensing for Individuals and Communities. p. 155–158, 2012.
- BOSH. *Digital pressure sensor*. 2009. Disponível em: <<https://www.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>>.
- CALTABIANO, D. et al. Architecture of a UAV for volcanic gas sampling. v. 1, p. 739–744, 2005.
- CETESB. *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo*. 2014. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>>.
- DEVARAKONDA, S. et al. Real-time Air Quality Monitoring Through Mobile Sensing in Metropolitan Areas. 2013.
- DROROBOTIS. *DHT11 Humidity & Temperature Sensor*. 2010. Disponível em: <<http://www.micropik.com/PDF/dht11.pdf>>.
- ELECTRONICS, H. *TECHNICAL DATA MQ-2 GAS SENSOR*. 2014. Disponível em: <<http://www.seeedstudio.com/depot/datasheet/MQ-2.pdf>>.
- ELECTRONICS, H. *TECHNICAL DATA MQ-7 GAS SENSOR*. 2014. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7.pdf>>.
- FAIÇAL, B. S. et al. The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks for spraying pesticides. *Journal of Systems Architecture*, v. 60, n. 4, p. 393–404, 2014. ISSN 13837621. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383762114000204>>.
- FOX, G. et al. A collaborative sensor grids framework. *2008 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems, CTS'08*, p. 29–38, 2008. ISSN 978-1-4244-2248-7.
- FURQUIM, G. et al. Combining wireless sensor networks and machine learning for flash flood nowcasting. In: *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2014 28th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 67–72.
- GIFFINGER, R. et al. *Smart cities-Ranking of European medium-sized cities*. [S.l.], 2007.
- LEROUX, T.; MORATA, T. Efeitos ototóxicos da exposição ao monóxido de carbono: uma revisão. p. 403–412, 2005.

MANNA, S.; BHUNIA, S.; MUKHERJEE, N. Vehicular pollution monitoring using iot. p. 1–5, May 2014.

MMA. *Poluentes Atmosféricos*. 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos>>.

PELLICER, S. et al. A global perspective of smart cities: A survey. In: IEEE. *Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS), 2013 Seventh International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 439–444.

PRONAR. *RESOLUÇÃO CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990*. 1990.

ROLDÁN, J. et al. Mini-UAV Based Sensory System for Measuring Environmental Variables in Greenhouses. *Sensors*, v. 15, n. 2, p. 3334–3350, 2015. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/2/3334/>>.

SANDBOXELETRONICS. *MQ-2 Smoke/LPG/CO Gas Sensor Module*. 2014. Disponível em: <<http://sandboxelectronics.com/?p=165>>.

SILVA, L. T.; MENDES, J. F. Determinação do índice de qualidade do ar numa cidade de média dimensão. 2006.

SIMEK, M.; MRAZ, L. SensMap: Web Framework for Complex Visualization of Indoor&Outdoor Sensing Systems. n. October, p. 28–31, 2013.

VIEIRA, H. d. F. *Provendo resiliência em uma rede de sensores sem fio linear e esparsa através de veículo aéreo não tripulado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2015.

VORMITTAG, R. et al. *1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil*. 2014. 267 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/C1CB3034/Monitoramento_Qualidade_Ar_Brasil1.pdf>.

WEN, T.-H. et al. Monitoring street-level spatial-temporal variations of carbon monoxide in urban settings using a wireless sensor network (WSN) framework. *International journal of environmental research and public health*, v. 10, n. 12, p. 6380–96, dez. 2013. ISSN 1660-4601. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3881120/>&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

ZANG, W. et al. Investigating small-scale water pollution with uav remote sensing technology. p. 1–4, June 2012. ISSN 2154-4824.