

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CÂMPUS LONDRINA

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

BRUNO LO FRANO MACHADO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR POR MEIO DE MICRO
SENSORES APLICADO AO CONCEITO DE CIDADE INTELIGENTE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2017

BRUNO LO FRANO MACHADO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR POR MEIO DE MICRO
SENSORES APLICADO AO CONCEITO DE CIDADE INTELIGENTE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina, como requisito para a obtenção do título de “Engenheiro Ambiental”.

Orientador: Prof. Dr. Admir Créso Targino

Co-orientador: Prof. Dr. Janksyn Bertozzi

LONDRINA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Câmpus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Sistema de monitoramento da qualidade do ar por meio de micro sensores aplicado
ao conceito de cidade inteligente

por

Bruno Lo Frano Machado

Monografia apresentada no dia 01 de dezembro de 2017 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____
(aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof^a. Dr^a. Patricia Krecl
(UTFPR)

Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels
(UTFPR)

Prof. Dr. Admir Créso Targino
(UTFPR)
Orientador

Prof^a. Dr^a. Edilaine Regina Pereira
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por me capacitar e dar forças, e à minha família, pelo incentivo e apoio incondicional em todos os momentos ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu professor e orientador Prof. Dr. Admir Créso Targino, por toda experiência e aprendizado passados ao longo desses três anos entre iniciação científica e trabalho de conclusão de curso, bem como pelo voto de confiança e oportunidades oferecidas nessa caminhada.

Agradeço também à Prof^a. Dr^a. Patricia Krecl, pela mentoria e conhecimento passado ao longo desses anos. Ao meu co-orientador Prof. Dr. Janksyn Bertozzi, pelo suporte durante o desenvolvimento desse trabalho. Ao grupo *Atmospher*, pela base científica e convívio desde o terceiro ano da graduação. Agradeço em especial aos amigos Rhuan Ancieto e Yago Cipoli, pelo companheirismo e auxílio em análise de resultados e instalações em campo durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço à Fundação Araucária, pela concessão de bolsa de iniciação científica, e ao CNPq (Projetos nº 400273/2014-4 e 404146/2013-9) pelo financiamento de equipamentos para o desenvolvimento do trabalho. Ao edital AWC (*Academic Working Capital*), por financiar parte dos equipamentos utilizados para desenvolver esse trabalho, bem como pela mentoria e aprendizado no mundo do empreendedorismo. Agradeço aos estabelecimentos comerciais parceiros pelo espaço cedido para a instalação das plataformas desenvolvidas.

Agradeço em especial à Giovana Simonetti, por todo apoio, amor e paciência depositados ao longo dessa caminhada. Por todas as opiniões, discussões científicas e apoio incondicional, por não ter medido esforços e estar ao meu lado nos momentos mais críticos do trabalho, me motivando sempre a me dedicar e alcançar meus objetivos, qualquer fosse a dificuldade.

Por fim, agradeço à minha família, Bruno Machado, Carla Machado, Victor Hugo Machado e Rafael Machado, por conta do apoio e amor ao longo de toda a graduação, pela capacidade de investir e acreditar em mim e por toda paciência e compreensão em momentos críticos. E aos meus avós, por todo suporte e atenção em todos os momentos durante esse período acadêmico.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de monitoramento de dados ambientais de baixo custo por meio de micro sensores, calibrado com equipamentos de referência, com dados disponibilizados para a população em tempo real em uma plataforma *online*. O sistema de coleta de dados usou a plataforma Arduino® e comunicação via internet (com e sem cabo), com micro sensores de temperatura do ar, umidade do ar e partículas inaláveis finas (diâmetro < 2,5 µm). Todos os processos de calibração seguiram uma metodologia da Agência Ambiental dos EUA, exclusiva para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento da qualidade do ar com sensores de baixo custo. Foram analisados parâmetros como linearidade de resposta e exatidão das medidas. Após calibração em laboratório, a plataforma foi instalada em campo, com dados de três pontos de monitoramento na cidade de Londrina (PR), disponibilizados em tempo real em uma página *web*. Os dados de temperatura e umidade do ar tiveram alta correlação com o equipamento referência, com R^2 variando entre 0,98 e 0,99. Após a correção aplicada, apresentaram baixos valores de desvio padrão e de coeficiente de variação (entre 2% e 8%) em todas as faixas de valores analisadas. Para a variável $MP_{2,5}$, o R^2 variou entre 0,85 e 0,95 para os diferentes sensores. Foi observada maior precisão em concentrações acima de $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Todas as variáveis apresentaram baixos valores de incerteza (entre 1% e 2%), após o processo de calibração. Com o sistema aplicado em campo, as variáveis temperatura e umidade continuaram a demonstrar um ótimo comportamento em relação ao equipamento referência. Os dados de $MP_{2,5}$ em campo apresentaram resultados um pouco inferior, e identificou-se que alguns fatores ambientais, como composição do aerossol atmosférica e umidade do ar, podem afetar a resposta do sensor. Observou-se estabilidade na comunicação com e sem cabo com a plataforma *online*. O sistema desenvolvido é uma alternativa econômica e cientificamente robusta para disponibilizar dados ambientais para a população e tomadores de decisão, desde que seguida de forma criteriosa os procedimentos de calibração. O estudo enfatiza o potencial para a criação de uma rede própria de monitoramento, ou para complementar de redes já existentes.

Palavras chave: Poluentes atmosféricos. Temperatura e umidade do ar. Redes inteligentes. Arduino.

ABSTRACT

This project aimed to develop a low-cost monitoring system for environmental variables using micro sensors, calibrated with reference instruments and real-time data available online. The system used Arduino® technology and internet communication, with micro sensors for air temperature, relative humidity and fine particles (diameter < 2,5 µm). All the calibration methods followed the recommendations of the US Environmental Protection Agency, developed for air quality monitoring using low cost sensors. Performance features such as linearity of response and precision of measurement were evaluated. After validating the data, the platform was installed in field with real-time data streaming for three places in Londrina (PR) on a web platform. The air temperature and relative humidity sensors showed high correlations with the reference sensor (coefficient of determination $R^2 = 1$ and 0.98, respectively) and good stability during operation. These data also showed low standard deviation and variation coefficient values (between 2% and 8%). R^2 for the $MP_{2.5}$ sensor ranged from 0,85 to 0,95 for the different sensors. The variation coefficient dropped as particle concentration increased, showing that the sensors were not very accurate for measurements of low concentrations (<50 µg.m⁻³). All variables showed low bias after the calibration process (<2%). When deployed in the field, the air temperature and relative humidity sensors continued showing excellent behaviour compared with the reference instrument. The $MP_{2.5}$ data showed a somewhat inferior outcome, as some environmental factors, such as aerosol composition and air humidity, may have affected the sensor response. The communication via wi-fi and cable with the online platform was stable and, thus, feasible for field application. The results showed that this technology is an economic and scientifically robust alternative to provide environmental data to the population and decision makers, with potential for the development of a monitoring network or to complement networks already in place. In any case, the system must always be calibrated against reference sensors following pre-established protocols.

Key-words: Atmospheric pollutants. Air temperature and humidity. Smart networks. Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Climograma de Londrina para o período de 1986-2016.....	26
Figura 2: Imagem de satélite da região de estudo indicando os pontos de monitoramento.	28
Figura 3: Microcontrolador Arduino Uno R3.....	29
Figura 4: Sensor de temperatura e umidade do ar AM2302 DHT22.....	30
Figura 5: Dimensões do sensor de partículas DSM501A e diagrama de funcionamento, sendo PT, IRED, e R, fototransistor, diodo infravermelho e reistor térmico, respectivamente.	31
Figura 6: Módulo Ethernet W5100.....	31
Figura 7: Módulo Wi-Fi ESP8266.....	32
Figura 8: Estrutura global do sistema de rede a ser empregado na plataforma de monitoramento da qualidade do ar.	32
Figura 9: Sensor de temperatura e umidade HOBO-U23.	37
Figura 10: Processo de calibração em ambiente externo ao laboratório (a) e protótipo em ambiente interno (b).	38
Figura 11: Monitor de MP _{2,5} modelo 8520.....	39
Figura 12: Experimento de calibração do sensor de partículas em laboratório.	40
Figura 13: Plataformas instaladas em campo nos empreendimentos parceiros. (a)Sistema na carcaça em acrílico; (b)Zerão; (c)Rua Humaitá.	41
Figura 14: Dispersão dos dados de temperatura e umidade coletados pelos três sensores DHT22, onde n corresponde ao número de dados, R ao coeficiente de correlação e R^2 ao coeficiente de determinação.	46
Figura 15: Dispersão dos dados de temperatura e umidade coletados pelos 3 sensores DHT22 intercomparado com o HOBO, onde n corresponde ao número de dados e R ao coeficiente de correlação.....	47
Figura 16: Desvio padrão (a) e coeficientes de variação (b) das séries de temperatura medidas com três DHT22 em relação ao equipamento referência. Valores em vermelho representam o número de amostras em cada faixa.	49
Figura 17: Desvio padrão (a) e coeficientes de variação (b) das séries de umidade do ar medidas com três DHT22 em relação ao equipamento	

referência. Valores em vermelho representam o número de amostras em cada faixa.	50
Figura 18: Dispersão dos dados de partículas coletados pelos três sensores DSM501A.	51
Figura 19: Dispersão dos dados de saída (<i>LPO</i>) coletados pelos três sensores DSM501A intercomparado com o DustTrak.	52
Figura 20: Desvio padrão (a) e coeficientes de variação (b) para a variável $MP_{2,5}$. Valores em vermelho representam o número de amostras em cada faixa.	53
Figura 21: Série temporal de temperatura medida com o sensor DHT22 e HOBO-U23 em campo (média de 10 minutos).	55
Figura 22: Série temporal de umidade relativa medida com o sensor DHT22 e HOBO-U23 em campo (dados com média de 10 minutos).	56
Figura 23: Série temporal de $MP_{2,5}$ medido com o sensor DSM501A e o DustTrak em campo para o dia 16/11/2017 (a) e 17-18/11/2017 (b) (média de 30 minutos).	58
Figura 24: Captura de tela do site rtairqual.com , ilustrando mapa interativo de pontos monitorados.	59
Figura 25: Captura de tela do site rtairqual.com , ilustrando informações sobre temperatura e umidade do ar.	59
Figura 26: Captura de tela do site rtairqual.com , ilustrando informações sobre $MP_{2,5}$	60
Figura 27: Captura de tela do site rtairqual.com , ilustrando histórico de 24 horas.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição de custos de componentes da plataforma.	33
Tabela 2: Estrutura do índice de qualidade do ar.....	42
Tabela 3: Qualidade do ar e efeitos à saúde.....	43
Tabela 4: Relação entre temperatura e umidade do ar, para obtenção do índice de calor (sensação térmica).	44
Tabela 5: Quadro de riscos e efeitos de acordo com as faixas de índice de calor (sensação térmica).....	45
Tabela 6: Coeficientes de correlação linear entre os sensores DHT22 e o equipamento referência HOBO-U23, calculados por regressão linear simples.	47
Tabela 7: Coeficientes de correlação linear entre os sensores DSM501A e o equipamento referência DustTrak, calculados por meio do modelo matemático dos mínimos quadrados.....	52

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DENATRAN	Departamento Nacional De Trânsito
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
DT	DustTrak
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Environmental Protency Agency
HAP	Hazardous Air Pollutants
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Calor
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IQA	Índice de Qualidade do Ar
LPO	Low Pulse Occupancy
MAP	Major Air Pollutants
MP	Material Particulado
MP ₁₀	Partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm
MP _{2,5}	Partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm
NH ₄	Amônia
NO	Óxido Nítrico
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₃	Ozônio Troposférico
OMS	Organização Mundial da Saúde
PR	Paraná
PTS	Partículas Totais Suspensas
PWM	Pulse-Width Modulation
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO _x	Óxidos de Enxofre
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3 JUSTIFICATIVA	17
4 REFERENCIAL TEÓRICO	19
4.1 QUALIDADE DO AR EM CENTROS URBANOS	19
4.2 POLUENTES ATMOSFÉRICOS	20
4.3 CIDADE INTELIGENTE.....	22
4.4 SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR	23
5 MATERIAL E MÉTODOS	26
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
5.2 PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS.....	28
5.2.1 Microcontrolador Arduino Uno R3.....	29
5.2.2 Sensor de temperatura e umidade DHT22	29
5.2.3 Sensor de partículas DSM501A.....	30
5.3 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO.....	31
5.4 PRECIFICAÇÃO DA PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS.....	33
5.5 COLETA DE DADOS.....	33
5.5.1 Calibração dos sensores	34
5.5.2 Aplicação em campo.....	40
5.6 ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR (IQA)	41
5.7 ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO.....	43
6 RESULTADOS	46
6.1 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	46
6.1.1 Sensor de temperatura e umidade DHT22	46
6.1.2 Sensor de partículas DSM501A.....	50
6.2 APLICAÇÃO DA PLATAFORMA EM CAMPO.....	54
6.2.1 Intercomparação entre DHT22 e HOBO-U23	54
6.1.2 Intercomparação entre DSM501A e DustTrak	56
6.3 IMPLANTAÇÃO DA PLATAFORMA WEB.....	58
7 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ANEXO A – Esquema elétrico da plataforma com micro sensores, desenvolvido utilizando o *software* Fritzing.....71

ANEXO B- Programação da plataforma realizada na IDE do Arduino.....72

1 INTRODUÇÃO

O ar é um recurso vital e sua qualidade deve estar dentro de limites que permitam manter a vida da fauna e flora no planeta. Essa qualidade deve garantir a saúde pública e suportar outras formas de vida com ecossistemas diversificados e sustentáveis. Além disso, o ar deve ser de boa qualidade para evitar a corrosão de materiais, preservar paisagens e proteger culturas agrícolas (VALLERO, 2007).

A maioria das cidades em todo o mundo sofre de graves problemas de qualidade ar e tem recebido cada vez mais atenção nos últimos anos. O problema de degradação da qualidade do ar não afeta apenas cidades de grande porte ou megacidades (com mais de 10 milhões de habitantes), como Pequim (China), São Paulo (Brasil), Cidade do México (México), Nova York (EUA) e Londres (Inglaterra) (MAYER, 1999), mas também cidades de médio porte (com população entre 100 e 500 mil habitantes¹) como Christchurch (Nova Zelândia) (BALDAUF *et al.*, 2008) e Londrina (Brasil) (TARGINO e KRECL, 2016). Alguns fatores responsáveis pela deterioração da qualidade do ar em cidades são o aumento das emissões devido aos processos de geração de energia, processos industriais, utilização de combustíveis fósseis e aumento da frota veicular impulsionados pelo crescimento da população, observado principalmente nos países em desenvolvimento (MAYER, 1999). Isso ocorre pois o crescimento de cidades muitas vezes se dá de forma desordenada e sem planejamento da demanda de recursos e infraestrutura necessários para sua manutenção.

A poluição atmosférica existe em todas as escalas, desde extremamente local (por exemplo, altos níveis de partículas em suspensão em cruzamentos de ruas de intenso tráfego) até global (por exemplo, alta concentração de gases de efeito estufa na troposfera). As fontes de poluição atmosférica podem ser classificadas como fontes naturais e antropogênicas. As fontes naturais são aquelas não relacionadas com as atividades humanas, como erupção de vulcões, incêndios florestais naturais, tempestade de poeira, *spray* marinhos e liberação de pólen pelas plantas. Como fontes antropogênicas, consideram-se as indústrias, fábricas, usinas de energia elétrica, automóveis, fornos domésticos, lareiras, churrasqueiras, e queima de

¹ STAMM *et al.* (2013) definem cidades de porte médio no contexto brasileiro com população entre 100 mil e 500 mil habitantes.

resíduos e folhas a céu aberto (VALLERO, 2007). A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que a poluição do ar é responsável por cerca de 8 milhões de mortes anualmente devido a doenças crônicas não transmissíveis (DCNT), como doenças respiratórias e doenças cardiovasculares (OMS, 2016).

Os riscos à saúde relacionados aos níveis altos de poluição do ar são mais evidentes em cidades com frotas veiculares antigas e mal preservadas, atividade industrial intensa e afetadas pelo transporte de poluentes atmosféricos de longo alcance. Esses riscos podem ser aumentados quando episódios de poluição do ar ocorrem em conjunto com eventos extremos de temperatura e baixa umidade relativa do ar, especialmente em áreas urbanas com tendência a aquecer de forma mais rápida que os arredores. KATSOUYANNI *et al.* (1993), por exemplo, mostraram em estudo conduzido na Grécia que associações entre poluição do ar (ozônio e fumaça) e mortalidade foram mais fortes em períodos de temperaturas mais elevadas.

Em países desenvolvidos, medidas de controle de poluição acompanham historicamente o desenvolvimento crescente das cidades, em resposta à demanda pública por remediação, baseadas na educação ambiental ou conhecimento dos níveis, das causas e efeitos da poluição, além de legislação e fiscalização mais rigorosas. Por outro lado, os países em desenvolvimento necessitam de grandes esforços para conscientizar a população sobre os efeitos da poluição no meio ambiente e os custos para cada indivíduo, sociedade e estado. Portanto, o monitoramento de parâmetros ambientais, bem como o armazenamento e disseminação de dados de poluição para a população podem ser um bom caminho para aumentar a sensibilização ambiental nas cidades (ABRAHAM e PANDIAN, 2013). No Brasil, por exemplo, apesar de ser um dos seis países que mais publicam pesquisa sobre poluição atmosférica no mundo, não se estabelecem políticas públicas que de fato venham trazer benefícios para a saúde da população. O Brasil possui uma pequena rede de monitoramento de poluição atmosférica (o número de estações de monitoramento de poluição do ar no Brasil é 1,15 por milhão de habitantes, enquanto na Alemanha há 23 estações por milhão de habitantes), registra níveis elevados de poluentes atmosféricos e ainda adota padrões de poluição do ar defasados da Europa e Estados Unidos (FAJERSZTAJN *et al.*, 2013).

As metodologias atuais de monitoramento de poluição atmosférica geralmente utilizam equipamentos em locais fixos, e sua implementação generalizada é limitada

em função do alto custo. Além disso, muitas vezes o acesso aos dados é limitado, se não ausente, e estão disponíveis para apenas uma parcela da população. Nesse contexto, é desejável ter acesso a medições em tempo real de forma mais frequente e com maior abrangência espacial com o objetivo de analisar e identificar rapidamente níveis alarmantes de poluentes de forma que a população possa ser informada (DEVARAKONDA *et al.*, 2013).

Assim, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da qualidade do ar e conforto térmico baseado no conceito de cidade inteligente, onde se utilizam tecnologias de informação para a coleta e disseminação de dados para melhorar a qualidade de vida da população, pode consistir uma alternativa para o acesso à informação sobre aspectos ambientais em centros urbanos de forma contínua e acessível (BAKICI *et al.*, 2013).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de qualidade do ar e clima urbano de baixo custo por meio de micro sensores.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma plataforma portátil com micro sensores de monitoramento da qualidade do ar e conforto térmico;
- Calibrar micro sensores com equipamentos de referência;
- Implantar a plataforma em diferentes pontos da cidade de Londrina (PR);
- Disponibilizar gratuitamente dados para a população em tempo real em uma plataforma *online* com base em categorias facilmente acessíveis à população.

3 JUSTIFICATIVA

A cidade de Londrina é a segunda maior cidade do estado do Paraná (553.393 habitantes) e nos últimos cinco anos sua população aumentou 9% (IBGE, 2016). Londrina tem uma das maiores taxas de motorização do Brasil (690/mil habitantes), maior até mesmo que a cidade de São Paulo (641/mil habitantes) e Brasília (663/mil habitantes) (DENATRAN, 2016; IBGE 2016). Nesse contexto, estima-se que o aumento da taxa de motorização tenha levado a uma diminuição da qualidade do ar nos últimos anos. No entanto, apenas em 2016 instalou-se a primeira estação de monitoramento da qualidade do ar na cidade, que é administrada pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP), com custos estimados por volta de um milhão de reais somente em equipamentos. Até então, informações sobre a qualidade do ar na cidade eram provenientes de algumas coletas realizadas por grupos de pesquisa em universidades, como o grupo “Atmospher” da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/Câmpus Londrina) (TARGINO e KRECL, 2016; KRECL *et al.*, 2015). No que tange variáveis meteorológicas, a cidade de Londrina conta com estações de monitoramento administradas pelo Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar), Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (Infraero), UTFPR e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). No entanto, apenas a estação do Simepar fornece informação em linha e em tempo real. Essa informação, contudo, pode não representar a situação meteorológica na cidade, já que altos gradientes térmicos foram observados em Londrina devido ao mosaico de diferente uso do solo e geometria urbana. O gradiente pode ser magnificado sob regimes de circulação atmosférica específicos, como sistemas de alta pressão (TARGINO *et al.*, 2014).

Assim, o presente estudo propõe implantar um sistema de monitoramento da qualidade do ar e conforto térmico por micro sensores de baixo custo, cerca de R\$ 400,00 (US\$123,31, considerando cotação do dia 05/12/2017) por plataforma, como uma alternativa inovadora para o mapeamento da qualidade do ar na cidade. Devido à sua versatilidade de implantação, o sistema possibilitará o desenvolvimento de um diagnóstico local da exposição dos londrinenses a determinados poluentes atmosféricos e perfis de temperatura e umidade relativa do ar em diferentes regiões da cidade.

A disponibilização de dados de qualidade do ar e meteorológicos em tempo real pode auxiliar na identificação de locais que possam representar perigo à saúde e vida da população local. Ao ter acesso a esses dados, a população (principalmente aqueles mais sensíveis a poluentes) terá a possibilidade de tomar decisões acerca de suas atividades cotidianas, como, por exemplo, evitar horários e locais com altos níveis de poluição do ar ou desconforto térmico. Além dos dados disponíveis em tempo real, os níveis de poluição do ar serão apresentados de forma simplificada por meio de um índice em escala qualitativa (boa, moderada, ruim, muito ruim e péssima), baseado na proposta da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), com o objetivo de facilitar a assimilação da informação. O nível de conforto térmico será avaliado com base em um índice de calor fornecido pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA, do inglês: *National Oceanic and Atmospheric Administration*). O índice leva em consideração a relação entre temperatura ambiente e umidade relativa do ar, definindo qual a intensidade de calor que uma pessoa sente (ROTHFUSZ, 1990). Esse sistema pode ainda servir de protótipo para projetos futuros em escalas maiores que possam abranger diferentes regiões da cidade.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 QUALIDADE DO AR EM CENTROS URBANOS

A poluição do ar é definida como a presença de substâncias contaminantes no ar em fase sólida, líquida ou gasosa em concentrações que interferem na saúde humana ou no seu bem estar ou, ainda, que produzam outros efeitos ambientais nocivos (EPA, 2015). A qualidade do ar no meio urbano pode ser afetada por poluentes gasosos, como dióxido de nitrogênio (NO₂), monóxido de carbono (CO), ozônio troposférico (O₃), óxidos de enxofre (SO_x), e material particulado (MP) (STEINLE *et al.*, 2013). Nas últimas décadas, o número de estudos relacionando a qualidade do ar e a saúde humana tem aumentado devido a evidências de efeitos negativos da exposição a poluentes atmosféricos a curto e longo prazo (e.g., BEELEN *et al.*, 2014; CAREY *et al.*, 2013; CROUSE *et al.*, 2012).

O substancial aumento das emissões de poluentes atmosféricos devido ao crescimento econômico e industrial no último século tornou a qualidade do ar um importante problema ambiental em todo o mundo (D'AMATO *et al.*, 2010). A emissão de poluentes atmosféricos em ambiente urbano é ocasionada por diferentes processos antropogênicos categorizados de acordo com a fonte, tráfego veicular, indústrias, plantas de energia, comércio e queima de resíduos domésticos. Com o crescimento das cidades, ocorre um aumento no número de pessoas que utilizam veículos pessoais como meio de transporte, bem como um aumento nas distâncias percorridas. Alguns fatores influenciam diretamente a emissão de poluentes por fontes veiculares, como tipo dos veículos, intensidade de tráfego, tipo de combustível, tecnologia dos motores, disponibilidade de dispositivos de pós-tratamento de emissões, condições meteorológicas, entre outros (WU *et al.*, 2015; HEI, 2010; ZUURBIER *et al.*, 2010).

De forma geral, o tráfego de veículos é a fonte mais importante de poluição atmosférica nas cidades, representando 39% e 15% das emissões de óxido de nitrogênio (NO_x) e material particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm (MP_{2,5}), respectivamente (CASERINI *et al.*, 2013). Dessa forma, as consequências da deterioração da qualidade do ar para a população urbana são mais acentuadas nos países em desenvolvimento, com tendência a operar frotas veiculares antigas e mal preservadas (TARGINO e KRECL, 2016). Por exemplo, em

Montevideu (Uruguai), a frota de ônibus funciona a diesel e tem idade média de 12 anos; já em Lima (Peru), a idade média é de 20 anos (CAF, 2009). Um aspecto importante é que além de operar com tecnologia antiga, os ônibus nessas cidades não possuem filtros de partículas, o que contribui substancialmente para o aumento das emissões de MP (FLEISCHMAN *et al.*, 2017).

4.2 POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Os poluentes atmosféricos podem ser divididos em dois grupos: aqueles cujos padrões de concentração estão regulados pelos órgãos ambientais (também chamados de majoritários, ou MAP, por sua sigla em inglês), e os perigosos (*Hazardous Air Pollutants*, HAP), que causam câncer e outros efeitos severos nos seres humanos, como deformidades congênitas. No Brasil, a resolução CONAMA Nº 003/1990 dispõe sobre os padrões da qualidade do ar de sete contaminantes majoritários: partículas totais em suspensão (PTS, cujo diâmetro aerodinâmico é menor que 50 µm), fumaça, MP com diâmetro menor que 10 µm (MP₁₀), dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), monóxido de carbono (CO) e ozônio troposférico (O₃). Os HAP estão presentes na atmosfera em concentrações bem menores que os MAP. Por exemplo, em áreas urbanas, concentrações típicas de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (como o benzopireno) chegam a 0,005 ppb, enquanto as concentrações de CO podem chegar a 1800 ppb (WIEDERKEHR e YOON, 1998).

O MP é a designação comum para partículas em suspensão na atmosfera e abrange uma variedade de componentes, como poeira, fuligem, pólen e gotículas (VALLERO, 2007). Apesar do CONAMA regular apenas as concentrações de PTS, e um subgrupo delas, o MP₁₀, a OMS sugere que as concentrações de MP_{2,5} sejam reguladas devido a evidências mais robustas sobre os efeitos de partículas nessa fração sobre a saúde humana. O MP_{2,5} é pequeno o suficiente para penetrar o sistema respiratório humano, e altas concentrações ambientais tem relação direta com problemas respiratórios, cardiovasculares e agravamento de doenças como a asma. Além disso, pode levar ao aumento de internações hospitalares e mortalidade por doenças, como o câncer de pulmão (OMS, 2013). Os membros da União Europeia, os Estados Unidos, o Japão, entre outros países adotaram a média aritmética anual de 25 µg.m⁻³ como limite para o MP_{2,5}. No Brasil, o único estado que

regula o $MP_{2,5}$ é São Paulo, com limite anual de $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Em geral, o $MP_{2,5}$ e MP_{10} se originam de diferentes fontes, são removidos da atmosfera por mecanismos diferentes, tem diferentes composições químicas, propriedades ópticas distintas e diferem significativamente em seus padrões de deposição no sistema respiratório.

As concentrações de CO em ambiente urbano são afetadas principalmente por processos de combustão, como veículos motorizados e processos industriais. O CO é incolor e inodoro, dificultando sua detecção por pessoas expostas a ele. Quando inalado, o CO é facilmente transportado dos pulmões para a corrente sanguínea, diminuindo a capacidade de transporte de oxigênio para as células e causando desde efeitos imediatos como dores de cabeça, tonturas, fraquezas e distúrbios visuais, até efeitos mais severos devido a exposições prolongadas ou agudas, como doenças respiratórias, inconsciência e morte (RAUB *et al.*, 2000).

O O_3 é um gás produzido naturalmente na atmosfera e é encontrado tanto na estratosfera como na troposfera terrestre. Na estratosfera, o O_3 tem a importante função de servir como escudo para a radiação ultravioleta emitida pelo Sol. O O_3 troposférico encontrado próximo à superfície terrestre resulta da produção fotoquímica na presença de alguns precursores como CO, metano (NH_4), hidrocarbonetos não-metânicos, e óxidos de nitrogênio (NO_x) (SEINFELD e PANDIS, 2016) e tem efeitos deletérios sobre a saúde humana e clima. Como o O_3 é pouco solúvel em água, a maior parte do O_3 inalado alcança o sistema respiratório acarretando problemas na saúde humana se estiver em altas concentrações.

Em ambientes urbanos, o NO_x consiste principalmente de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2). Suas principais fontes são os meios de transporte e processos industriais, sendo 50% de sua emissão associada com o transporte por caminhões leves à gasolina e carros e 25% associado com caminhões pesados à gasolina e veículos a diesel (SEINFELD e PANDIS, 2016). O NO_x tem papel fundamental na química da atmosfera já que participa no processo fotoquímico de formação do O_3 (MONKS *et al.*, 2015) e de $MP_{2,5}$ (FUZZI *et al.*, 2015), além da formação de chuva ácida que pode causar eutrofização (EPA, 1999). O NO_2 causa ainda efeitos deletérios à saúde em exposição de curto prazo (e.g., MILLS *et al.*, 2015).

Em ambientes urbanos, O SO_2 tem como principal fonte de emissão a queima de combustíveis que contém enxofre, como óleo diesel, óleo combustível industrial e gasolina. Ele tem a capacidade de reagir com outras substâncias presentes no ar

formando partículas de sulfato que são responsáveis pela redução da visibilidade na atmosfera. O SO₂ tem efeitos tanto sobre o meio ambiente, quanto sobre a saúde humana. No ambiente, esse poluente pode causar a danificação da folhagem de plantas e formação da chuva ácida, prejudicando ecossistemas sensíveis. Em curto prazo, a exposição a altas concentrações de SO₂ pode prejudicar o sistema respiratório humano, principalmente em idosos e crianças sensíveis à poluição (EPA, 2016).

A fumaça (comumente chamado de fuligem em português) é um componente do MP_{2,5} contribuindo com 20-80% dessa fração (TARGINO *et al.*, 2016). A fuligem é formada pela combustão incompleta de materiais contendo carbono, como biomassa e combustíveis fósseis. Uma de suas principais fontes no ambiente urbano é a combustão de motores (especialmente a diesel). Esse poluente tem efeitos negativos sobre a saúde e resultados de estudos epidemiológicos associados à exposição de MP_{2,5} e MP₁₀ são geralmente associados também à fuligem (JANSSEN *et al.*, 2012).

Como exposto, o ar em ambiente urbano é composto por uma complexa matriz de substâncias tóxicas cujas concentrações, na maioria das cidades brasileiras, são desconhecidas devido à falta de monitoramento. A escassez de informações refinadas sobre a qualidade do ar dificulta a conscientização pública sobre as questões de saúde decorrentes da poluição, e a tomada de decisão eficiente sobre planejamento urbano e políticas públicas de saúde.

4.3 CIDADE INTELIGENTE

O conceito de “cidade inteligente” pode ser entendido como o centro urbano do futuro ambientalmente seguro e eficiente, com infraestruturas avançadas como sensores, dispositivos eletrônicos e redes para estimular o desenvolvimento econômico sustentável e uma elevada qualidade de vida (CARAGLIU *et al.*, 2008; BOWERMAN *et al.*, 2000). Atualmente, a maioria das cidades em toda a Europa e também nos Estados Unidos já iniciou ou está prestes a iniciar a abordagem de cidade inteligente em função da sua importância em relação ao crescimento urbano ampliado (BAKICI *et al.*, 2013; DAVIS, 2010; O'CONNELL, 2008).

O rápido crescimento da população urbana demanda de forma exigente o desenvolvimento sustentável e uma melhor habitabilidade. Apesar das cidades

ocuparem menos de 2% do território terrestre, os residentes urbanos consomem mais de três quartos dos recursos naturais do mundo e são os principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa (MARCEAU, 2008). Problemas decorrentes da rápida urbanização indicam uma perda de funcionalidades básicas para que um lugar seja habitável. Por exemplo, dificuldade em gestão de resíduos, escassez de recursos, poluição atmosférica, deterioração da saúde humana, controle de tráfego e envelhecimento de estruturas (NAM e PRADO, 2011; TOPETTA, 2010; WASHBURN, 2010; BORJA, 2008).

Para prevenir que a intensa urbanização seja uma crise, é necessário administrar as cidades de forma inovadora. Barcelona (Espanha) é considerada uma cidade com sucesso no desenvolvimento urbano em toda Europa e é pioneira no sentido de tornar-se uma cidade inteligente, com iniciativas na área industrial. Distritos inteligentes, laboratórios vivos, serviços eletrônicos, infraestruturas e dados disponíveis são alguns dos componentes da estratégia de cidade inteligente em Barcelona. Além disso, existem serviços destinados a tornar o cotidiano dos cidadãos mais fácil e confortável, promovendo a participação dos cidadãos na gestão da cidade através de redes corporativas de fibra óptica para edifícios municipais, conexão sem fio pública, rede de sensores de qualidade do ar e ambientais (temperatura, umidade, poluição e ruído) e pontos de recarga para carros elétricos (BAKICI *et al.*, 2013).

4.4 SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

Tendo em vista os gastos dos sistemas públicos de saúde no tratamento de doenças relacionadas com a poluição do ar, governantes têm se preocupado cada vez mais com os perigos de altas concentrações de poluentes atmosféricos em cidades, especialmente relacionados com as emissões de veículos motorizados. SILVA *et al.* (2012) mostrou uma forte relação entre poluição do ar e problemas econômicos na cidade de São Paulo (Brasil), com perdas monetárias estimadas em 6,5 milhões de dólares relacionadas a faltas no trabalho. MIRAGLIA e GOUVEIA (2014) estimaram custos anuais de 1,7 bilhões de dólares relacionando mortes prematuras e poluição do ar em 29 capitais brasileiras. Muitos países desenvolvidos implementaram com sucesso medidas para reduzir emissões em áreas onde a concentração de pessoas e a densidade de veículos são altas. Na Europa, cidades

como Londres, Milão, Munique e Estocolmo introduziram zonas de baixa emissão onde o acesso de determinados veículos é restrito, baseado na idade e tipo de veículo e período do dia e dia da semana, com redução dos níveis de poluição (HOLMAN *et al.*, 2015; ELIASSON, 2009; JOHANSSON *et al.*, 2009).

O método usual para monitorar os níveis de poluição do ar e alertar a população sobre os danos causados é através de medições com estações fixas de monitoramento. Mesmo assim, devido ao alto custo, o número de estações geralmente é reduzido e apresenta baixa densidade, impossibilitando que se observem os gradientes espaciais dos poluentes (LIU *et al.*, 2011). De forma geral, a poluição do ar apresenta grande variabilidade espacial em cidades, devido a fatores como estrutura urbana, volume de tráfego, uso do solo e meteorologia (TARGINO *et al.*, 2016; CAVELLIN *et al.*, 2015). Desse modo, redes de estações esparsas podem não capturar de forma adequada a variabilidade espacial dos poluentes, sendo necessário assim, uma maior abrangência espacial dessas redes de monitoramento em um centro urbano (WILLIAMS *et al.*, 2013; MARSHALL *et al.*, 2008).

Uma das alternativas para o monitoramento da qualidade do ar pode ser o sistema de redes de sensores sem fio (RSSF), que tem como vantagens a portabilidade, facilidade de configuração, baixo custo e também a possibilidade de fornecer dados em tempo real. Recentemente, o progresso em tecnologias de sensores, processamento e comunicação por rádio reduziu o custo, tamanho e consumo de energia dos sensores. No entanto, o desempenho do sistema de RSSF ainda está sujeito à velocidade de computação, capacidade de memória e estabilidade de comunicação (LIU *et al.*, 2011). Como exemplo de aplicação de RSSF, pode-se citar um estudo conduzido na cidade de Madurai (Índia), onde Abraham e Pandian (2013) desenvolveram um sistema móvel de monitoramento de poluição do ar de baixo custo (usando tecnologia Arduino®) com sensores de dióxido de carbono (CO₂), CO e amônia (NH₄), além de sensores de posicionamento geográfico. O monitoramento foi feito durante o transporte em ônibus de estudantes para escolas, e os resultados foram disponibilizados em tempo real no ônibus para melhorar a conscientização dos estudantes sobre as questões ambientais.

Para superar a limitação de disponibilidade de dados, este projeto de pesquisa tem como foco principal desenvolver protótipos de uma plataforma de medição de poluentes atmosféricos e conforto térmico utilizando sensores de MP_{2,5}, temperatura e umidade do ar de baixo custo. Os sensores foram testados em

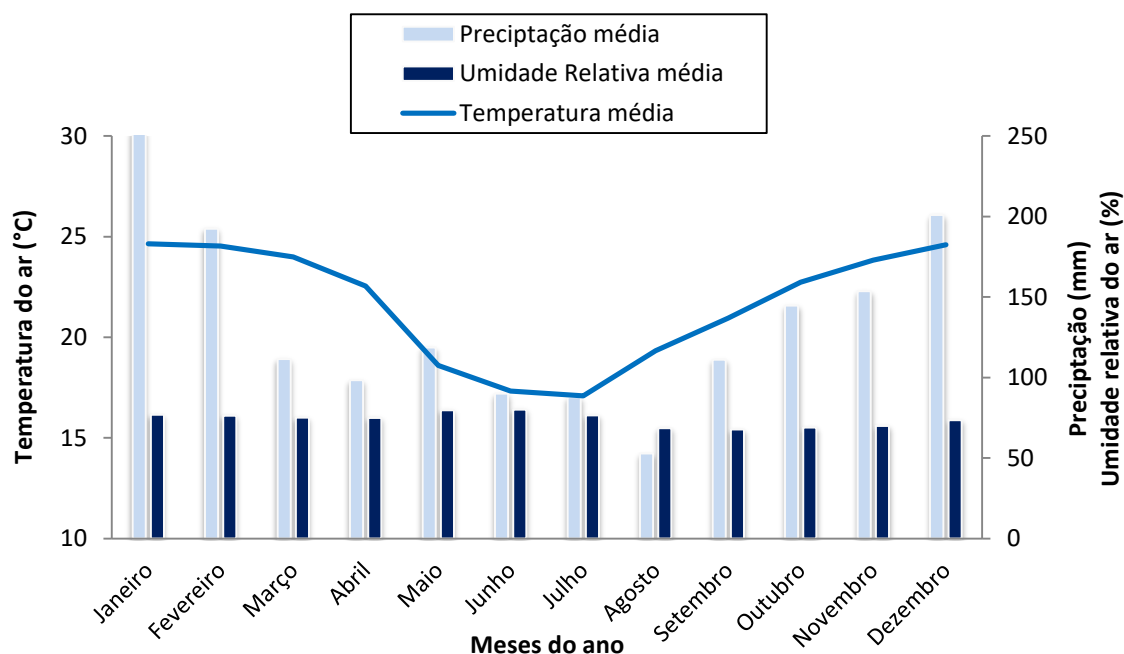
laboratório e comparados com equipamentos referência de forma a determinar seu desempenho e confiabilidade. As plataformas foram instaladas em uma região movimentada do centro de Londrina e os dados disponibilizados para a população. Com a ajuda de medições de qualidade do ar precisas, informações de poluição podem ser efetivamente disseminadas e as pessoas podem ser aconselhadas a tomar decisões baseadas em níveis de poluição em tempo real para acomodar suas necessidades individuais de saúde (DEVARAKONDA *et al.*, 2013).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na cidade de Londrina (PR), uma cidade com 558.439 habitantes (IBGE, 2017), situada entre 23°08' 47" e 23°55'46" Sul, e entre 50°52'23" e 51°19'11" Oeste, com altitude média 630 m. O clima de Londrina é do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen, ou seja, clima subtropical úmido, com ocorrência de chuvas nos meses de verão e geadas com pouca frequência no inverno (LONDRINA, 2015). A temperatura média anual do município para os últimos 31 anos é de 17,5 °C, atingindo temperatura média de 27,0 °C nos meses mais quentes, e 9,0 °C nos meses mais frios, com média anual de umidade relativa do ar de 80%. A precipitação média acumulada anual é de 1.600 mm, sendo o período menos chuvoso entre abril e agosto (81 mm a 107 mm) e o período mais chuvoso, dezembro, janeiro e fevereiro (entre 155 mm a 220 mm) (INMET, 2017). A Figura 1 mostra o climograma para a cidade de Londrina durante os últimos 31 anos.

Figura 1: Climograma de Londrina para o período de 1986-2016.



Fonte: Autoria própria (Dados INMET, 2017).

A frota veicular de Londrina até junho de 2017 era de 389.636 veículos, o que equivale a uma taxa de motorização de 698 veículos/1000 habitantes (DENATRAN,

2017). A frota está composta por 63% de automóveis, 21% motocicletas, 10% comerciais, 5% caminhões e 1% ônibus. Quanto ao combustível utilizado, 82% utilizam gasolina, 9% álcool e 7% diesel (DETRAN PR, 2016).

De acordo com o inventário oficial de emissões atmosféricas de 2011 para a cidade, que inclui as emissões industriais e veiculares, as fontes veiculares contribuem com 98% do CO emitido (31.935 ton/ano) e 78% para NOx (2164 ton/ano), enquanto as indústrias dominam as emissões de partículas com 67% do total (464 ton/ano), contra um total de 220 ton/ano por veículos (IAP, 2013). Outras fontes de poluição atmosférica na cidade são as frequentes e ilegais queimas de resíduos domésticos, principalmente em locais afastados da região central (TARGINO e KRECL, 2016) e queima de madeira e carvão em restaurantes e pizzarias. A região onde Londrina está localizada é frequentemente afetada pela fumaça da queima de biomassa em outras regiões da América do Sul e transportadas pela circulação atmosférica de larga escala (ROSÁRIO *et al.*, 2013).

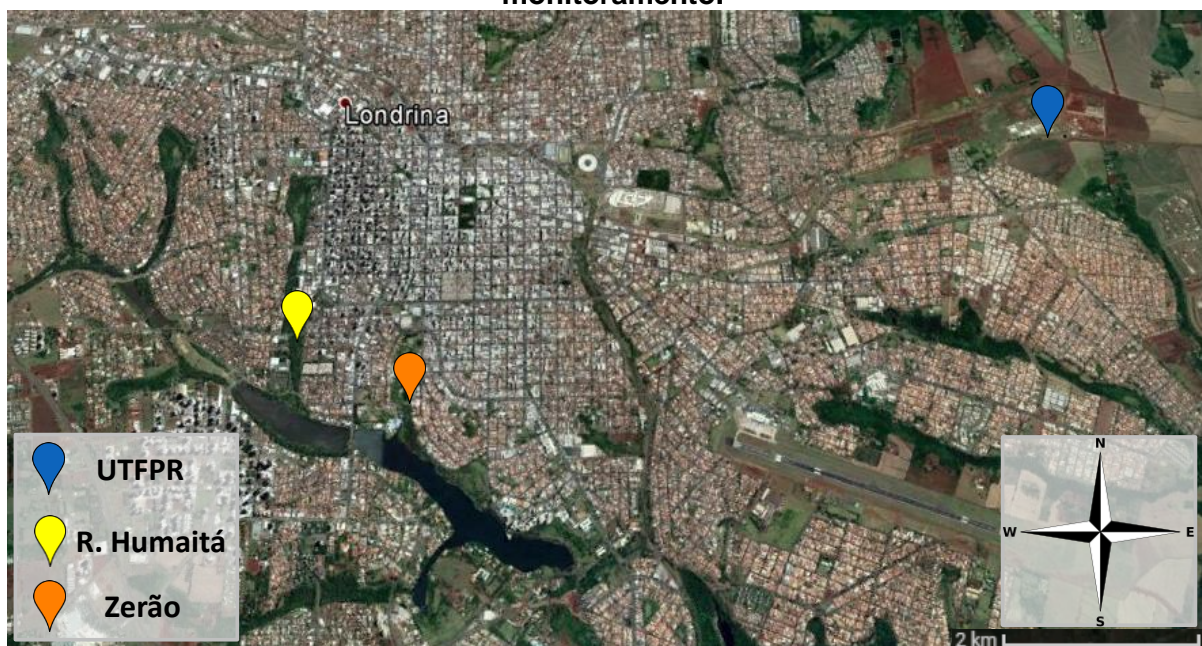
O estudo foi realizado em duas áreas da cidade: no Câmpus da UTFPR e na região do Lago Igapó II e seu entorno (Figura 2). Os pontos foram escolhidos para determinar a variabilidade espacial dos poluentes atmosféricos, temperatura do ar e umidade relativa do ar.

A UTFPR tem uma população total de 1.966 pessoas, contando com cerca de 1.725 alunos, 166 professores (efetivos e contratados), 75 servidores técnico-administrativos e oferta cursos de graduação e pós-graduação. O fluxo veicular durante a semana apresenta média de 250 veículos h^{-1} ao longo do dia, e de 400 veículos h^{-1} no horário de pico (18h).

A região do Lago Igapó II de Londrina e seu entorno (Rua. Humaitá e Área de lazer Luigi Borghesi – “Zerão”) foi escolhida por ser um local comumente utilizado para lazer e prática de atividades físicas pela população, sendo duas de suas extremidades (leste e oeste) vias de tráfego intenso de veículos (1.600 veículos h^{-1} para a Avenida Higienópolis), com emissões veiculares constantes durante todo o dia, principalmente em horários de pico como no início da manhã e fim da tarde. Além disso, esses períodos são frequentemente procurados pela população para a prática de esportes ao ar livre.

Tanto o processo de calibração dos sensores como o processo de montagem da plataforma foram conduzidos no laboratório de pesquisa de poluição atmosférica urbana e clima, *Atmospher*, situado na face sul do Câmpus.

Figura 2: Imagem de satélite da região de estudo indicando os pontos de monitoramento.



Fonte: Google Earth (2017).

5.2 PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS

Para o desenvolvimento da plataforma de coleta de dados e transmissão utilizaram-se um conjunto de sensores, microcontrolador, e módulos de comunicação. O microcontrolador é um dispositivo eletrônico que permite receber informações geradas pela leitura de sensores, e assim transmitir os dados coletados via módulos de comunicação. Mais especificamente, utilizaram-se módulos de comunicação Ethernet (via cabo) e Wi-Fi (sem cabo). O microcontrolador escolhido na realização deste trabalho foi o Arduino®, popular por sua ampla gama de aplicações e simplicidade de programação. O Arduino® foi desenvolvido na Itália em 2005 por um grupo de pesquisadores com o intuito de ser utilizado na comunidade acadêmica. Desde o início, a plataforma Arduino® foi baseada na filosofia *open source*, ou seja, de abertura para acesso de informações acerca de seu *hardware*, *software* e projetos, oferecendo a possibilidade para que qualquer pessoa interessada consulte, examine ou modifique o projeto (TORRES *et al.*, 2015).

Algumas das grandes vantagens de utilizar plataformas como o Arduino® são a possibilidade de controlar dispositivos físicos, receber e tratar dados por meio de uma interface programável, possibilitando diferentes modificações ao longo do desenvolvimento do projeto. Para a criação de um projeto com Arduino®, é

necessário comunicá-lo com um computador por meio de um *software* integrado de desenvolvimento, para criação e execução das rotinas de trabalho (IDE, *Integrated Development Environment*). O IDE do Arduino utiliza uma linguagem específica de programação, inspirada em linguagens C/C++ (MOREIRA *et al.*, 2013).

5.2.1 Microcontrolador Arduino Uno R3

O Arduino® Uno (Arduino, Itália) tem como componente principal o microcontrolador ATmega328P, que por intermédio de compiladores pode ser programado de acordo com a função desejada. Por meio de um segundo microcontrolador (ATmega16U2), a placa pode ser conectada ao computador por porta USB. O ATmega16U2 possui seis entradas analógicas e 14 pinos digitais de entrada, onde uma gama de periféricos podem ser conectados, como sensores e placas auxiliares (Figura 3). Como fonte de energia utiliza-se uma fonte DC chaveada de 9V e 1A, frequentemente utilizada para alimentação de microcontroladores.

Figura 3: Microcontrolador Arduino Uno R3.



Fonte: Arduino (2017).

5.2.2 Sensor de temperatura e umidade DHT22

O sensor de temperatura e umidade DHT22 (Aosong, China) (Figura 4) utiliza técnica de coleta de sinal digital, possuindo internamente um sensor de umidade capacitivo e um termistor, além de um conversor analógico/digital para comunicação com o microcontrolador. O sensor capacitivo tem sua medição baseada na mudança de sua capacitância em relação à variação da umidade do ar (BOGDAN, 2016). O termistor mede a mudança de sua resistência elétrica em função da variação de temperatura (DEFELICE, 1998). A temperatura de cada sensor é calibrada

previamente em fábrica e seu coeficiente de calibração é armazenado em sua memória, sem a possibilidade de ser alterado. Seu tamanho pequeno, baixo consumo de energia e longa distância de transmissão de dados para o microcontrolador (20 m) permitem que o DHT22 seja utilizado em diversas situações. Sua faixa de operação para a temperatura do ar é de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, com precisão de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, e faixa de operação para umidade relativa do ar entre 0 e 100%, com precisão de $\pm 2\%$.

Figura 4: Sensor de temperatura e umidade do ar AM2302 DHT22.

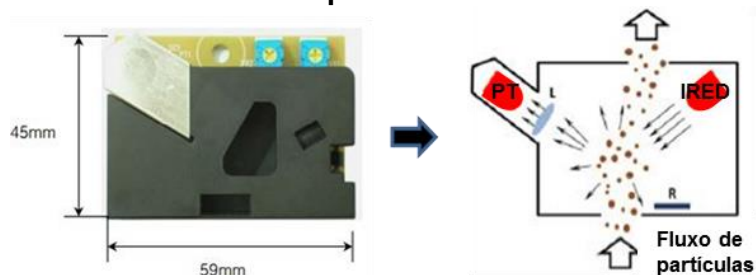


Fonte: Aosong Electronics (2017).

5.2.3 Sensor de partículas DSM501A

O sensor de partículas DSM501A (Samyoung S&C, Coreia do Sul) é capaz de detectar partículas maiores que $1,0\text{ }\mu\text{m}$, em suspensão em um espaço de até 30m^3 , com faixa de detecção de concentração de partículas entre 0 e $1,4\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 5). Seu funcionamento consiste em um resistor térmico interno para gerar calor criando uma corrente ascendente de ar que levará ar ambiente para o interior do módulo. As partículas presentes na corrente de ar ascendente fluem através de um caminho óptico iluminado por radiação infravermelha (que usualmente operam em uma banda de comprimento de onda entre 870 nm e 980 nm (SCHUBERT *et al.*, 2005) emitida por uma lâmpada de diodo. A radiação dispersada pelas partículas é detectada e convertida em sinal PWM (do inglês *Pulse-Width Modulation*), onde a LPO (do inglês *Low Pulse Occupancy*), porcentagem de tempo em que o sensor detecta partículas em um tempo total de amostragem de 30 segundos, pode ser diretamente correlacionada com a concentração de partículas.

Figura 5: Dimensões do sensor de partículas DSM501A e diagrama de funcionamento, sendo PT, IRED, e R, fototransistor, diodo infravermelho e resistor térmico, respectivamente.



Fonte: Samyoung S&C (2017).

5.3 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

Como forma de comunicação entre a plataforma e a internet, foram utilizados os módulos de comunicação Ethernet e Wi-Fi. Inicialmente, utilizou-se o módulo via cabo para a conexão da plataforma à internet em laboratório, devido a dificuldades de conexão sem fio na UTFPR. O módulo Shield Ethernet W5100 (Figura 6) permite que uma placa Arduino® se conecte à internet ou rede ethernet local via cabo. Ele é baseado no chip Wiznet ethernet W5100 e suporta até quatro conexões simultâneas (MOREIRA *et al.*, 2013).

Figura 6: Módulo Ethernet W5100.



Fonte: Filipe Flop (2017).

Para a implantação em campo, foram realizadas parcerias com estabelecimentos nas áreas de interesse, que disponibilizaram acesso à internet via Wi-Fi, com o intuito de conectar a plataforma à rede. Foi utilizado o módulo Wi-Fi ESP8266-01 (Figura 7), especialmente desenvolvido para que a conexão entre um microcontrolador e uma rede Wi-Fi seja realizada de forma fácil, eficaz e com baixo preço. O módulo é baseado no protocolo 802.11, definido por uma série de padrões de transmissão e codificação para comunicações sem fio, podendo trabalhar como

um ponto de acesso ou como uma estação, enviando e recebendo dados. Por meio das interfaces de comunicação disponibilizadas pelo Arduino® Uno, os sensores conectados à plataforma coletam e transmitem os dados para o módulo ESP8266, que por sua vez realiza a comunicação com a internet utilizando tecnologia sem fio e o protocolo de comunicação TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*).

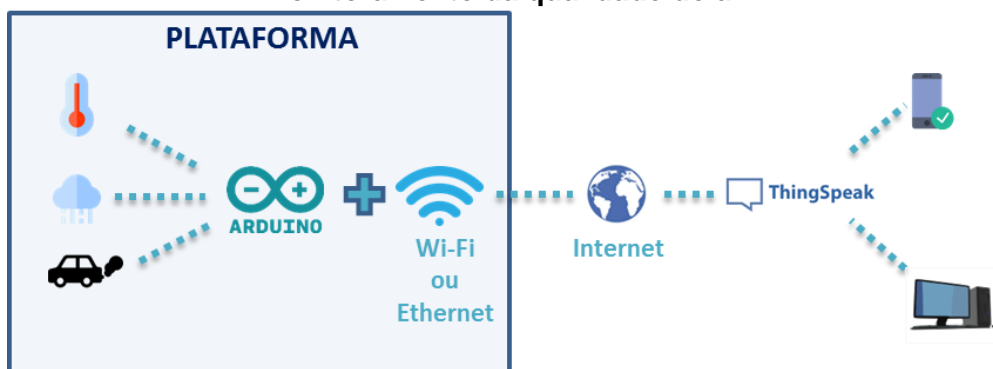
Figura 7: Módulo Wi-Fi ESP8266.



Fonte: Multilógica (2017).

A dinâmica de comunicação no sistema funciona a partir do recebimento periódico de dados de medição da plataforma, que são encaminhados para o servidor de banco de dados *ThingSpeak.com*. Esse servidor oferece uma infraestrutura *web* e um protocolo de comunicação para envio e recebimento de dados gerados em Arduino®, onde é feito o armazenamento e gerenciamento das informações. Um servidor *web* (www.rtairqual.com) foi implementado, recebendo os dados gerenciados no *ThingSpeak*, para fornecimento de uma interface acessível para usuários, de forma que o acesso aos dados coletados seja rápido e objetivo (Figura 8).

Figura 8: Estrutura global do sistema de rede a ser empregado na plataforma de monitoramento da qualidade do ar.



Fonte: Autoria própria (2017).

5.4 PRECIFICAÇÃO DA PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS

Um dos propósitos do presente trabalho é desenvolver um sistema de monitoramento da qualidade do ar (temperatura do ar, umidade do ar, e $MP_{2,5}$) de baixo custo. A Tabela 1 mostra um breve detalhamento dos custos para o desenvolvimento de uma plataforma com conexão via Wi-Fi, com cotação realizada em Novembro de 2017.

Tabela 1: Descrição de custos de componentes da plataforma.

Componente	Custo
Arduino UNO	R\$ 44,90
Sensor de temperatura e umidade DHT22	R\$ 37,90
Sensor de partículas DSM501A	R\$ 63,90
Módulo Wi-Fi ESP8266	R\$26,90
Alojamento para sensores e circuito elétrico	R\$250,00
Fonte DC 9V 1A	R\$14,90
Total	R\$ 388,50

Fonte: Aatoria própria (2017).

Em comparação com instrumentos de referência, os preços são extremamente mais baixos. Com a mesma quantia gasta com um equipamento referência de cada variável (aproximadamente R\$ 25.000,00), seria possível a aquisição de cerca de 60 plataformas de baixo custo, possibilitando assim uma implantação mais abrangente em um sistema de monitoramento da qualidade do ar e conforto térmico. Os custos da plataforma podem ser minimizados em processos de compra com mais unidades de cada componente.

5.5 COLETA DE DADOS

A primeira fase da coleta de dados foi realizada com o sensor de temperatura e umidade do ar durante aproximadamente 60 dias no laboratório de pesquisa *Atmospher* localizado na UTFPR (Câmpus Londrina), para que fosse testada a viabilidade de utilização dos sensores, bem como dos módulos de comunicação via *web*.

Os microsensores montados na plataforma foram comparados com os equipamentos de referência, para verificar a consistência do funcionamento dos sensores antes de sua calibração propriamente dita. Paralelamente, os dados foram disponibilizados em tempo real em uma página *web* (atmospher.org), para atestar a estabilidade de conexão da plataforma. Em seguida iniciou-se a fase de calibração.

5.5.1 Calibração dos sensores

O procedimento de calibração verifica e ajusta as medições de um instrumento comparando-as com um método padrão ou instrumento referência. A calibração de um sensor é imprescindível para confiabilidade dos dados e determinação dos limites de detecção e quantificação do analito. As verificações desses parâmetros devem ser realizadas nas mesmas condições (faixas de temperatura e umidade, intervalos de concentração, etc.) em que o instrumento referência opera, pois muitos sensores são fortemente influenciados por esses parâmetros (EPA, 2014).

Existem dois procedimentos principais para calibrar um instrumento. O primeiro consiste em fazer uma calibração com métodos padrões já existentes, no qual se utiliza um padrão de referência amplamente aceito para a variável desejada. O segundo realiza uma comparação com um instrumento de referência que foi calibrado com um padrão já reconhecido. Em ambos os procedimentos, deve-se localizar o sensor o mais próximo possível do instrumento referência a ser comparado, de modo que os dois dispositivos estejam medindo as variáveis em condições iguais. É importante que as calibrações laboratoriais sejam complementadas com calibrações em campo (EPA, 2014).

O objetivo da calibração é converter uma resposta do sensor (que é geralmente algum tipo de sinal eletrônico) em unidades úteis, por exemplo, em valores de concentração. Para isso, é necessário criar uma curva de calibração que relaciona as respostas do sensor com as respostas do instrumento de referência. Isto é feito criando um gráfico de dispersão de pontos, comparando as medições feitas pelo sensor com as concentrações ou medições padronizadas do instrumento de referência, relacionando-as através de modelos matemáticos (EPA, 2014).

Em 2013 a Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos realizou o workshop “*US EPA Air Sensor*”, que visou estabelecer padrões para o

monitoramento de variáveis relacionadas à qualidade do ar. A partir disso, foram recomendados sete parâmetros principais a serem investigados para o desenvolvimento de um novo sistema de qualidade do ar: (1) linearidade de resposta, (2) precisão das medidas, (3) limite de detecção, (4) resolução de concentração, (5) tempo de resposta, (6) interferências equivalentes, e (7) influência por umidade relativa e temperatura. Para o protótipo em desenvolvimento, foram investigados os parâmetros de linearidade de resposta e de exatidão das medidas para a produção de resultados de calibração, sendo necessário em estudos posteriores um embasamento mais completo incluindo todos os parâmetros.

A linearidade de resposta dos sensores (X) em relação ao equipamento referência (Y) é analisada por regressão linear simples, com apenas uma variável independente. Supondo que a relação linear entre as variáveis dependente (X) e independente (Y) é satisfatória, obtém-se a linha de regressão e um modelo matemático a partir de uma amostra de n pares de valores (X_i, Y_i), $i = 1, \dots, n$. A equação (1) descreve o modelo e tem a seguinte forma:

$$Y = aX + b \quad (1),$$

onde a é o coeficiente angular e representa a inclinação do modelo; b é o coeficiente linear e representa o ponto em que a reta do modelo corta o eixo das ordenadas quando $X_i = 0$. O desempenho do modelo foi avaliado usando os coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2). Para a obtenção dos coeficientes em questão, foi utilizado o método dos mínimos quadrados, que minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre os dados de saída do sensor e os dados do equipamento referência (HAIR *et al.*, 1998). O coeficiente de determinação indica quanto o modelo é capaz de explicar os dados coletados; quanto mais próximo de um, melhor o modelo.

A exatidão das medidas foi avaliada com base na precisão com o desvio padrão e coeficiente de variação, e na incerteza, que relaciona a média dos valores do sensor com as do equipamento referência. Todos os cálculos foram realizados por meio de funções pré-definidas em *software* de programação, com base nas equações 2, 3 e 4:

$$\text{Desvio padrão } (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |A_i - \mu|^2} \quad (2),$$

$$\text{Coeficiente de variação (\%)} = \frac{\text{Desvio padrão}}{\mu} \quad (3),$$

onde:

n: número de dados da amostra;

A_i : amostra de dados ($i = 1, \dots, n$);

μ : média dos dados da amostra.

$$\text{Incerteza (\%)} = \left[\left(\frac{\mu_{\text{sensor}}}{\mu_{\text{ref.}}} \right) - 1 \right] * 100 \quad (4),$$

onde:

μ_{sensor} : média dos dados do sensor;

$\mu_{\text{ref.}}$: média dos dados do equipamento de referência.

Na plataforma em desenvolvimento, o método a ser utilizado foi o de comparação com instrumentos de referência. Em todos os casos, primeiramente foram realizadas intercomparações de forma simultânea entre os sensores de mesmo tipo, para verificar a necessidade de aplicar uma correção para cada um separadamente. Posteriormente, os equipamentos foram colocados lado a lado e operados por um período entre cinco e sete dias de forma a capturar diferentes condições meteorológicas para as variáveis temperatura e umidade, e simulação em experimento laboratorial para diferentes perfis de concentração de $\text{MP}_{2,5}$, representativas de diferentes condições ambientais encontradas ao longo do ano nos pontos a serem monitorados. A seguir estão descritos os procedimentos específicos utilizados para a calibração de cada sensor.

5.5.1.1 Calibração do sensor de temperatura e umidade (DHT22)

Os dados do microsensor DHT22 foram comparados com o instrumento HOBO-U23 (Onset Computer, Bourne, EUA), equipamento reconhecido cientificamente pela União Europeia (ONSET COMPUTER, 2014) em monitoramento

de temperatura e umidade (Figura 9). O HOBO-U23 tem uma resolução para a variável temperatura de 0,02 °C para 25 °C e precisão de $\pm 0,21$ °C quando operado entre 0 e 50 °C. Para a variável umidade, tem uma resolução de 0,03 % e precisão de $\pm 2,5\%$ quando operado entre 10 e 90 %, e $\pm 5\%$ operando abaixo de 10% e acima de 90%. Os instrumentos foram operados com frequência de amostragem de dois minutos por um período total de aproximadamente cinco dias, de forma a capturar diferentes condições meteorológicas representativas dos pontos a serem monitorados, desde condições secas até períodos chuvosos. Os dados coletados passaram por análises estatísticas (regressão linear e coeficiente de determinação) para extrair a equação de calibração. Os resultados serão mostrados ao longo deste estudo.

Figura 9: Sensor de temperatura e umidade HOBO-U23.

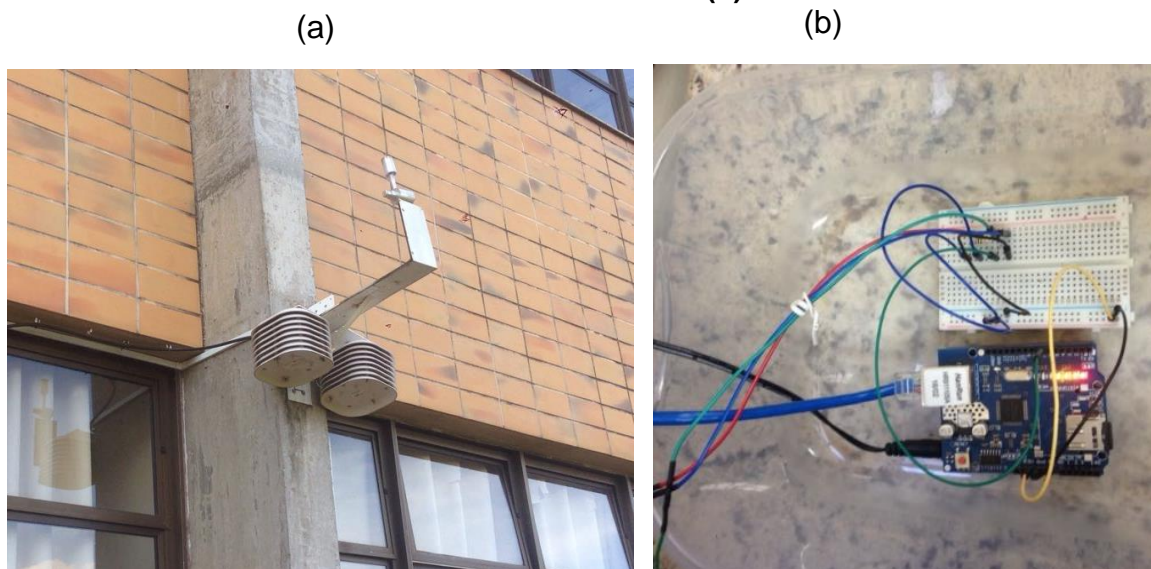


Fonte: Onset Computer (2017).

Para calibrar os microsensores de temperatura e umidade do ar, ambos os sensores foram acomodados em ambiente externo, em um abrigo com formato recomendado para aplicações externas de forma a eliminar possíveis interferências de intempéries como insolação excessiva, chuva e vento (Figura 10a). O circuito eletrônico utilizado para aquisição de dados pelo microsensor DHT22 foi mantido em laboratório (Figura 10b) e conectado ao mesmo por meio de fiação elétrica de aproximadamente 2,0 m de comprimento.

Os dados coletados foram analisados estatisticamente (regressão linear e coeficiente de determinação) para extrair a equação de calibração.

Figura 10: Processo de calibração em ambiente externo ao laboratório (a) e protótipo em ambiente interno (b).



Fonte: Autoria própria (2017).

5.5.1.2 Calibração do sensor de partículas DSM501A

Utilizou-se o equipamento DustTrak modelo 8520 TM (TSI Inc, EUA) como instrumento de referência para a calibração do sensor de partículas DSM501A. O DustTrak (Figura 11) é um fotômetro portátil que mede as concentrações de MP_{2,5} em tempo real através da sucção do ar ambiente contendo partículas, com resolução de 0,001 mg.m⁻³ e faixa de operação entre 0,001 e 100 mg.m⁻³. As partículas passam por uma câmara de detecção iluminada por uma fonte de radiação de 780 nm, espalhando luz em todas as direções. Posteriormente, um fotodetector localizado em um ângulo de 90° do laser detecta a quantidade da radiação espalhada pela partícula. Esse método determina o volume das partículas com base na intensidade da luz difusa e assumindo que as mesmas são esféricas. A concentração em massa (μg.m⁻³) é obtida usando-se densidade (ρ) de 2,6 g cm⁻³ proveniente da poeira de Arizona (*Arizona Test Dust*). Os valores de concentração em massa fornecidos pelo DustTrak sobrestimam os valores encontrados em material particulado urbano (TASIC *et al.*, 2012; WALLACE *et al.*, 2011), devido à menor densidade do mesmo em relação ao material particulado do *Arizona Test Dust*, como exemplo em um estudo feito em Shangai, ρ = 1,36 – 1,55 g cm⁻³ (YIN *et al.*, 2015) e ρ = 1,60 g cm⁻³ em Erfurt (PITZ *et al.*, 2003). Usualmente, é calculado um fator de correção para os dados medidos pelo DustTrak por meio de

amostragens simultâneas com o método gravimétrico, que pode ser encontrando em uma faixa de 1,70 (McNAMARA *et al.*, 2011) a 2,78 (WALLACE *et al.*, 2011). Um experimento realizado na UTFPR entre concentrações do DustTrak e análise gravimétrica resultou em um fator de correção próximo a 2,0, portanto todos os dados de $MP_{2,5}$ do presente estudo foram divididos por esse valor.

Figura 11: Monitor de $MP_{2,5}$ modelo 8520.



Fonte: TSI Inc (2017).

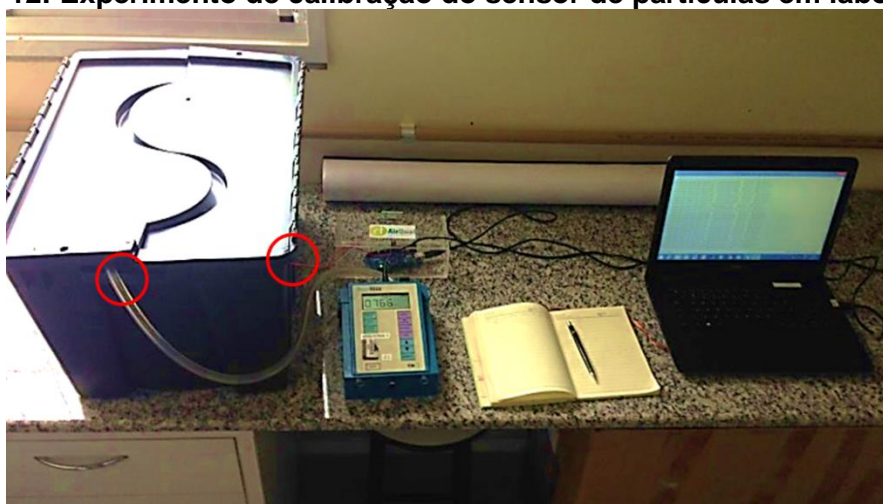
A calibração do sensor de partículas DSM501A foi realizado segundo o procedimento de WANG *et al.* (2015), que utiliza uma câmara de calibração inundada com partículas, onde o mesmo sensor foi colocado lado a lado, no interior da câmara, com o instrumento referência SidePak Personal Aerosol Monitor AM510 (TSI Inc, EUA) que opera tecnicamente da mesma forma que o DustTrak, utilizando o mesmo padrão de calibração (Arizona Test Dust). No estudo citado, utilizou-se incenso como fonte de partículas na câmara, que é relatado como uma importante fonte de partículas em ambiente interno em alguns países (CHENG *et al.*, 1995). Todo o processo de calibração levou cerca de 2,5 horas, que é próximo ao tempo de precipitação gravitacional de partículas com $1,0 \mu\text{m}$ de diâmetro aerodinâmico (WANG *et al.*, 2015).

A distribuição de tamanho das partículas geradas pela queima de incenso (tipo sândalo, marca SAC) possui tamanho médio na faixa de 260 nm (WANG *et al.*, 2015), valor esse muito próximo à faixa de tamanho em que se encontra a maior parte da massa de partículas de modo de acumulação (entre 100 e 300 nm) encontrados em ambientes urbanos dominados por fontes veiculares (KITTELSON, 1998). Partículas de modo de acumulação são formadas por combustão e são provenientes de fontes como escape de motores, fuligem e fumaça de cigarro, comumente encontradas em ambientes urbanos. Desse modo, a utilização do incenso para o processo de calibração em laboratório pode ser considerada

representativa em relação ao que se encontra em ambientes que serão alvos deste estudo.

No processo de calibração, utilizou-se uma câmara com furos nas laterais e na parte superior (caixa plástica OR-8, 57 x 39,5 x 32 cm), onde os equipamentos foram colocados lado a lado (Figura 12). A frequência de amostragem foi de 30 segundos para os dois equipamentos. Os dados coletados foram posteriormente comparados e passaram por análises estatísticas em software de programação, para que fossem avaliados os parâmetros referentes à metodologia de calibração entre o sinal de resposta do sensor e os valores de concentração do DustTrak.

Figura 12: Experimento de calibração do sensor de partículas em laboratório.



Fonte: Autoria própria (2017).

5.5.2 Aplicação em campo

Para a implantação em campo, além do ponto instalado na UTFPR, foram realizadas parcerias com estabelecimentos na área de interesse, que disponibilizaram acesso à internet via Wi-Fi e energia, com o intuito de conectar a plataforma à rede (Figuras 13a e 13b). Como forma de abrigo para o circuito elétrico e os sensores em campo, foi desenvolvida uma carcaça de acrílico, para que todo o sistema fosse protegido de intempéries. Para minimizar o efeito de aquecimento pela incidência de radiação com possíveis efeitos sobre os dados de temperatura e umidade do ar, a carcaça deve ser instalada preferencialmente em locais sombreados. A plataforma foi instalada em locais próximos ao Lago Igapó II em Londrina (PR), localizados conforme a Figura 2.

Figura 13: Plataformas instaladas em campo nos empreendimentos parceiros.
(a) Sistema na carcaça em acrílico; (b) Zerão; (c) Rua Humaitá.



Fonte: Autoria própria (2017).

Após a instalação da plataforma em campo, o período de coleta de dados estendeu-se por 10 dias, para verificar a qualidade de seu funcionamento contínuo. Os dados foram enviados em tempo real para uma plataforma *web* e puderam ser coletados de forma virtual. Para atestar a qualidade da plataforma em campo, foram feitas análises como forma de verificação da confiabilidade dos dados, por meio de comparações com equipamentos de referência realizadas no mesmo local, que serão apresentadas adiante.

5.6 ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR (IQA)

O índice de qualidade do ar (IQA) é uma ferramenta matemática para simplificar o processo de divulgação dos níveis de qualidade do ar e tem como base experiência desenvolvida pela EPA (CETESB, 2012). O estabelecimento de um IQA tem como objetivo principal proporcionar à população maior entendimento sobre as condições de qualidade do ar de certo local, levando em consideração diferentes poluentes atmosféricos monitorados em uma estação. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) definiu um índice de qualidade do ar que contempla MP_{10} , $MP_{2,5}$, fumaça, O_3 , CO , NO_2 e SO_2 , como mostra a Tabela 2. A metodologia da CETESB foi escolhida para o presente estudo por apresentar padrões mais

restritivos e mais atuais frente ao restante do Brasil, (como a inclusão do poluente $MP_{2,5}$), que em geral apresenta padrões desatualizados em relação aos países europeus e recomendações da OMS.

Para que as informações disponibilizadas por meio da página *web* sejam facilmente interpretadas e assimiladas por pessoas leigas, e com o intuito de facilitar a tomada de decisões com base nos índices de qualidade do ar local, o cálculo IQA foi aplicado aos dados de $MP_{2,5}$ coletados pelos sensores DSM501A.

Tabela 2: Estrutura do índice de qualidade do ar.

Qualidade	Índice	MP_{10} ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 24h	$MP_{2,5}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 24h	O_3 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 8h	CO (ppm) 8h	NO_2 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 1h	SO_2 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 24h
BOA	0-40	0-50	0-25	0-100	0-9	0-200	0-20
MODERADA	41-80	>50-100	>25-50	>100-130	>9-11	>200-240	>20-40
RUIM	81-120	>100-150	>50-75	>130-160	>11-13	>240-320	>40-365
MUITO RUIM	121-200	>150-250	>75-125	>160-200	>13-15	>320-1130	>365-800
PÉSSIMA	>200	>250	>125	>200	>15	>1130	>800

Fonte: CETESB (2012).

Os valores de IQA são calculados com base em metodologia descrita por Kiely (1996), de acordo com a equação abaixo:

$$IQA = \text{Índice}_{inicial} + \left(\frac{\text{Índice}_{final} - \text{Índice}_{inicial}}{\text{Conc.}_{inicial} - \text{Conc.}_{final}} \right) \times (\text{Conc.}_{medida} - \text{Conc.}_{inicial}) \quad (5),$$

onde:

IQA: Índice de qualidade do ar desejado;

Conc._{medida} : Concentração medida do poluente;

$\text{Conc.}_{inicial}$: Concentração inicial da faixa onde se encontra a concentração medida;

Conc._{final} : Concentração inicial da faixa onde se encontra a concentração medida;

$\text{Índice}_{inicial}$: Valor do índice inicial da faixa correspondente à concentração inicial;

Índice_{final} : Valor do índice final da faixa correspondente à concentração final.

A faixa de classificação do IQA considerada *boa* indica que os valores estabelecidos pela OMS para exposição a curto prazo estão sendo atendidos. Embora o IQA seja avaliado para todos os poluentes monitorados, ao ser divulgado, usa-se o maior índice, ou seja, o pior cenário encontrado em dado momento. Com base na qualificação do IQA, podem ser observados efeitos diversos à saúde, conforme a Tabela 3:

Tabela 3: Qualidade do ar e efeitos à saúde.

Qualidade	Índice	Significado
BOA	0-40	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
MODERADA	41-80	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
MUITO RUIM	121-200	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
PÉSSIMA	>200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: CETESB (2012).

5.7 ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO

Para a implementação do índice de conforto térmico, foi tomado como base o índice de calor (IC) (ou temperatura aparente) criado pela NOAA (EUA), que expressa a sensação térmica do corpo humano baseado em dados de umidade

relativa e temperatura do ar. O cálculo do IC é feito com base em estudos biometeorológicos (STEADMAN, 1979) e pode ser definido de acordo com a equação 6, adaptada para a escala de graus Celsius (ROTHFUSZ, 1990):

$$IC = 0,55 (-42,38 + 2,05T + 10,14U - 0,22UT - 6,84 \times 10^{-3}T^2 - 5,48 \times 10^{-2}U^2 + 1,23 \times 10^{-3}T^2U + 8,53 \times 10^{-4}TU^2 - 1,99 \times 10^{-6}T^2U^2) \quad (6),$$

onde:

IC: Índice de calor (°C);

T: Temperatura do ar (°F);

U: Umidade relativa do ar (%).

Para facilitar a assimilação do IC e a tomada de decisões com base nas informações sobre conforto térmico, utilizaram-se quadros (Tabelas 4 e 5) com faixas de valores de temperatura e umidade relativa do ar, onde correlacionados resultam em valores de sensação térmica, bem como recomendações para cada faixa. Os quadros foram anexados à plataforma *web*, de forma que a interpretação dos dados fosse simplificada.

Tabela 4: Relação entre temperatura e umidade do ar, para obtenção do índice de calor (sensação térmica).

Umidade relativa (%)	Temperatura do ar (°C)								
	21	24	27	29	32	35	38	40,5	43
10	18,3	21,1	23,9	26,7	29,4	32,2	35	37,8	40,5
20	18,9	22,2	25	27,8	30,5	33,9	37,2	40,5	44,4
30	19,4	22,8	25,5	28,9	32,2	35,5	40	45	50,5
40	20	23,3	26,1	30	33,9	38,3	43,3	50,5	58,3
50	20,5	23,9	27,2	31,1	35,5	41,7	48,9	57,2	65,5
60	21,1	24,4	27,8	32,2	37,8	45,5	55,5	65	
70	21,1	25	29,4	33,9	41,1	51,1	62,2		
80	21,7	25,5	30	36,1	45	57,8			
90	21,7	26,1	31,1	38,9	50				
100	22,2	26,7	32,8	42,2					

Fonte: NOAA (adaptado, 2017).

Tabela 5: Quadro de riscos e efeitos de acordo com as faixas de índice de calor (sensação térmica).

Sensação térmica	Classificação	Efeitos
< 26,7 °C	Risco mínimo	Pouco efeito.
26,7 – 32,2 °C	Cuidado	Possível fadiga por exposição prolongada e/ou atividade física.
32,2 – 39,4 °C	Cuidado extremo	Possível insolação, câimbra ou exaustão por exposição prolongada e/ou atividade física.
39,4 – 51,1 °C	Perigo	Provável câimbra ou exaustão e possível insolação por exposição prolongada e/ou atividade física.
>51,1 °C	Perigo extremo	Alta probabilidade de insolação

Fonte: NOAA (adaptado, 2017).

6 RESULTADOS

6.1 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

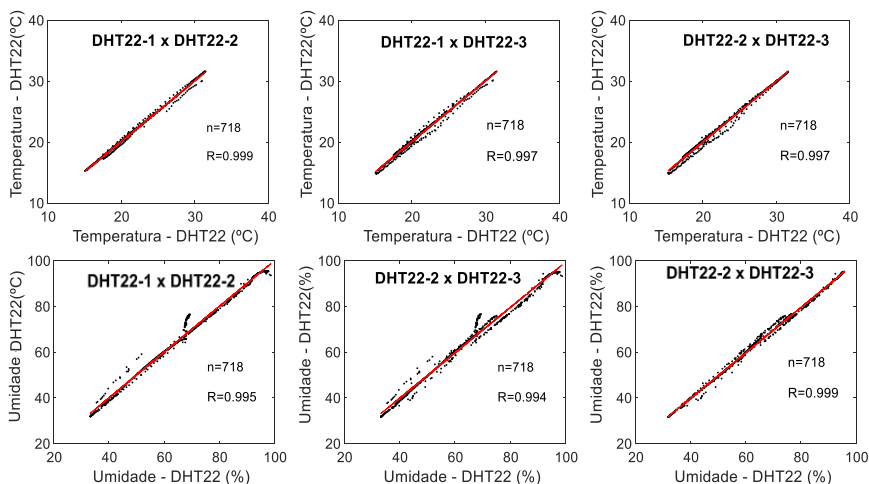
Na presente seção, foram avaliados os resultados de calibração de três sensores de cada tipo em relação ao seu respectivo equipamento referência. Para temperatura e umidade do ar, estão identificados da seguinte forma: DHT22-1, DHT22-2, DHT22-3 e HOBO (HOBO-U23), e para a variável $MP_{2,5}$ serão DSM-1, DSM-2, DSM-3 e DT (DustTrak).

6.1.1 Sensor de temperatura e umidade DHT22

6.1.1.1 Intercomparação entre os sensores

Durante os experimentos de intercomparação dos sensores DHT22-1, DHT22-2 e DHT22-3, tanto a variável temperatura quanto a umidade relativa mostraram uma alta correlação linear entre os mesmos ($R = 0,99$ para todas as intercomparações) para um período de coleta de aproximadamente cinco dias. Apesar da alta correlação entre cada sensor para ambas as variáveis, observou-se certa variação na correlação entre os pontos tanto de temperatura, como de umidade relativa do ar (Figura 14). Portanto fez-se necessário a aplicação de uma calibração exclusiva para cada sensor, bem como para cada variável.

Figura 14: Dispersão dos dados de temperatura e umidade coletados pelos três sensores DHT22, onde n é o número de dados e R o coeficiente de correlação.

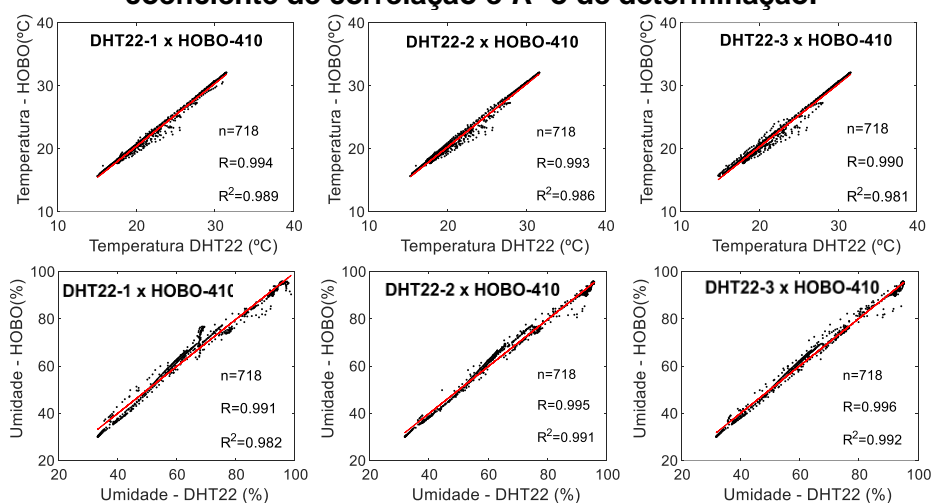


Fonte: Autoria própria (2017).

6.1.1.2 Linearidade de resposta

A Figura 15 mostra as intercomparações realizadas entre os sensores DHT22-1, DHT22-2 e DHT22-3 contra o equipamento referência HOBO-U23, para as variáveis temperatura e umidade. Pode-se destacar o alto grau de correlação entre os sensores e o equipamento referência, para ambas as variáveis, com R^2 variando entre 0,98 e 0,99.

Figura 15: Dispersão dos dados de temperatura e umidade coletados pelos 3 sensores DHT22 intercomparado com o HOBO, onde n é o número de dados, R o coeficiente de correlação e R^2 o de determinação.



Fonte: Autoria própria (2017).

Também foram calculados os valores de coeficiente linear (b) e angular (a) para a extração da equação de correção referente a cada sensor para temperatura e umidade, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Coeficientes de correlação linear entre os sensores DHT22 e o equipamento referência HOBO-U23, calculados por regressão linear simples.

Sensor	Temperatura			Umidade		
	a	b (°C)	R^2	a	b (%)	R^2
DHT22-1	0,99	0,36	0,99	0,94	6,44	0,98
DHT22-2	1,00	0,27	0,99	0,97	4,85	0,99
DHT22-3	0,99	0,38	0,98	0,97	4,67	0,99

Fonte: Autoria própria (2017).

O coeficiente angular representa a proporção de mudança do valor da variável dependente em relação à variação de uma unidade da independente, portanto quanto mais próximo de um, melhor é seu comportamento. Observam-se bons resultados para o coeficiente a para os três sensores, tanto para temperatura quanto para umidade do ar, variando entre 0,94 e 1,00.

Para o coeficiente linear, definido como o valor onde a linha da equação cruza o eixo independente, entende-se que quanto mais próximo a zero, melhor o resultado. Portanto, para a variável temperatura obteve-se bons resultados de b , na faixa de 0,27 a 0,38 °C para os três sensores. Para os dados de umidade do ar, observam-se maiores valores do coeficiente b (entre 4,67 e 6,44). Esses são os menores valores de umidade do ar que os microsensores conseguem medir. No entanto, como dificilmente a umidade do ar atinge esses valores, os microsensores poderão ser usados na maioria das aplicações urbanas.

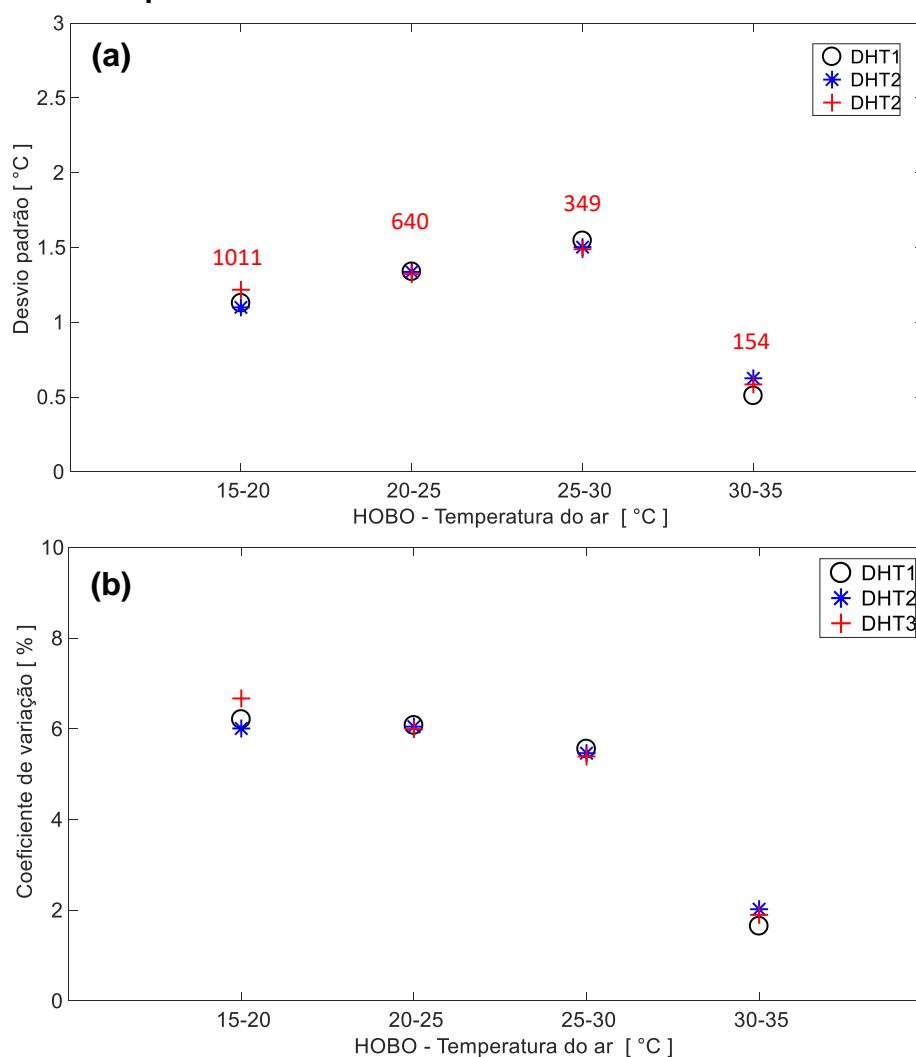
6.1.1.3 Exatidão das medidas

Para o cálculo de desvio padrão e coeficiente de variância, foram criadas seis faixas de valores para as variáveis temperatura e umidade em função do equipamento referência, onde os parâmetros foram avaliados em cada uma delas e para cada sensor especificamente, como mostram as figuras 16 e 17.

O desvio padrão referente à variável temperatura se manteve baixo em todas as faixas de valores para todos os sensores, variando entre 0,5 a 1,5 °C. O coeficiente de variação teve seu valor máximo na faixa de 15-20°C (6%) e mínimo na faixa de 30-35°C (2%).

O maior valor de incerteza ocorreu para o sensor DHT1, com valor próximo a 1% em relação aos valores do equipamento referência, demonstrando ótima exatidão. Além disso, apesar de pouca, é possível observar certa variação entre esses parâmetros para os diferentes sensores analisados.

Figura 16: Desvio padrão (a) e coeficientes de variação (b) das séries de temperatura medidas com três DHT22 em relação ao equipamento referência. Valores em vermelho representam o número de amostras em cada faixa.

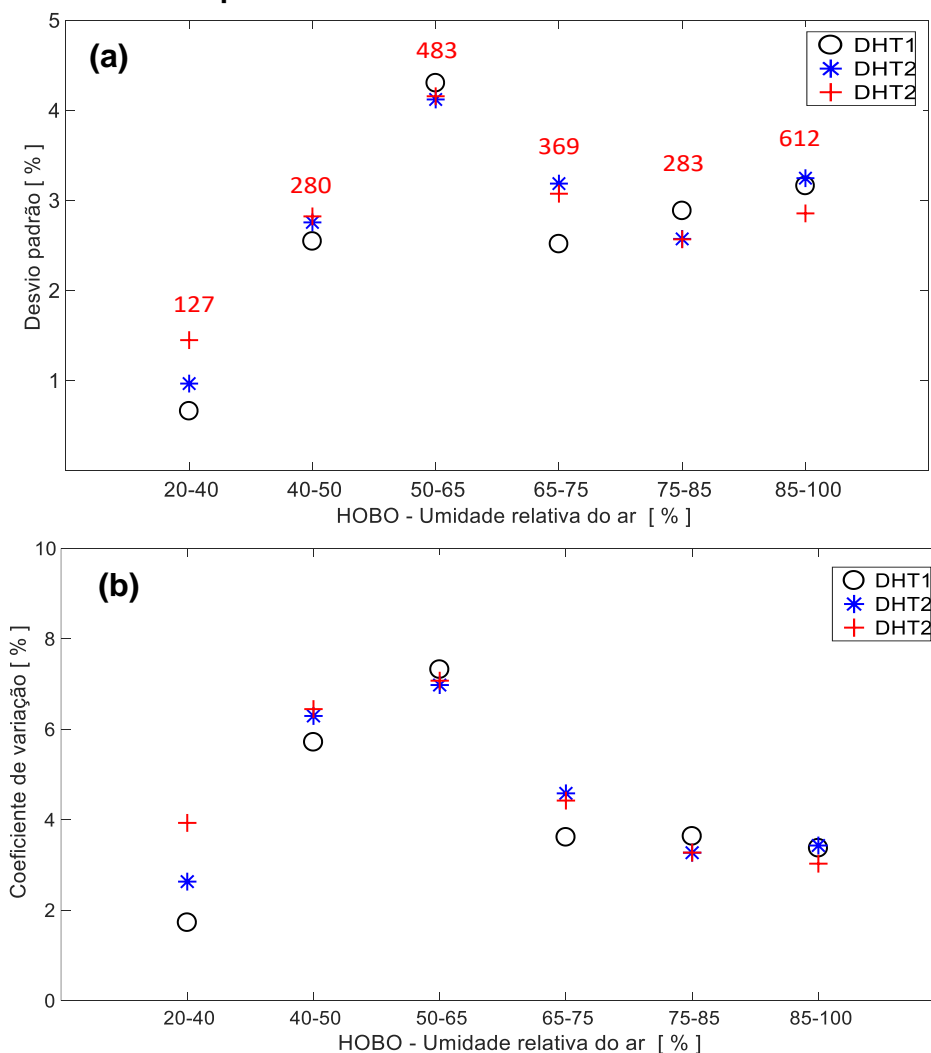


Fonte: Autoria própria (2017).

Em relação à variável umidade do ar, observa-se uma variação maior entre os sensores. Os desvios padrões foram também relativamente baixos, demonstrando maiores valores na faixa de 50-65% (aproximadamente 4%), e coeficiente de variação mais alto em faixas menores, expondo certa instabilidade em condições baixas de umidade relativa do ar.

Em relação à incerteza, também foram encontrados valores insignificantes, sendo os três sensores com valores de incerteza menores que 1%, atestando assim sua exatidão.

Figura 17: Desvio padrão (a) e coeficientes de variação (b) das séries de umidade do ar medidas com três DHT22 em relação ao equipamento referência. Valores em vermelho representam o número de amostras em cada faixa.



Fonte: Autoria própria (2017).

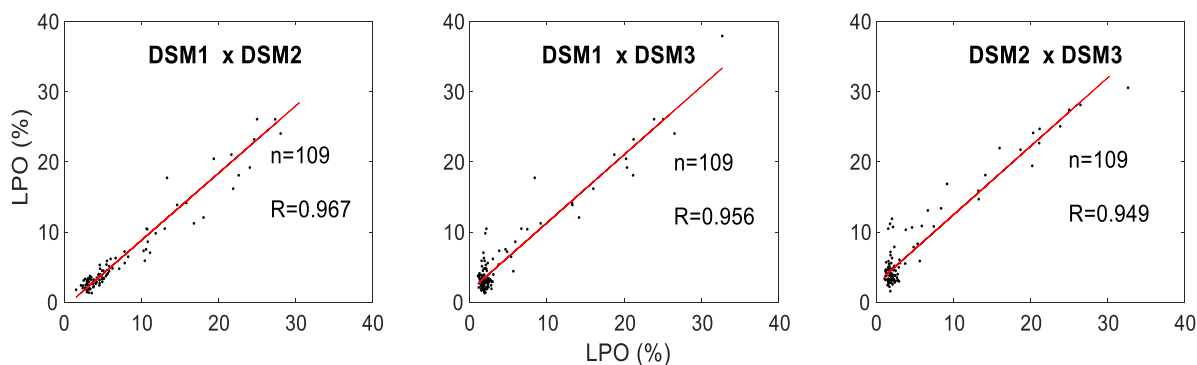
6.1.2 Sensor de partículas DSM501A

6.1.2.1 Intercomparação entre os sensores

Os experimentos de intercomparação para os sensores DSM-1, DSM-2 e DSM-3 demonstram alta correlação linear entre os valores de LPO dos mesmos, com valores próximos a uma relação positiva perfeita (R entre 0,95 e 0,97) para uma coleta de aproximadamente duas horas. Esses valores são comparáveis ao estudo de WANG *et al.* (2017), que encontraram R igual a 0,97. Apesar da alta correlação, foi possível observar certa variação entre os pontos de cada correlação (Figura 18). Essa variação é mais evidente quando se analisa o desvio padrão dos sensores

(Seção 6.1.2.3), como ocorreu para as variáveis temperatura e umidade do ar, indicando a necessidade de aplicar uma calibração exclusiva para cada sensor.

Figura 18: Dispersão dos dados de partículas coletados pelos três sensores DSM501A.

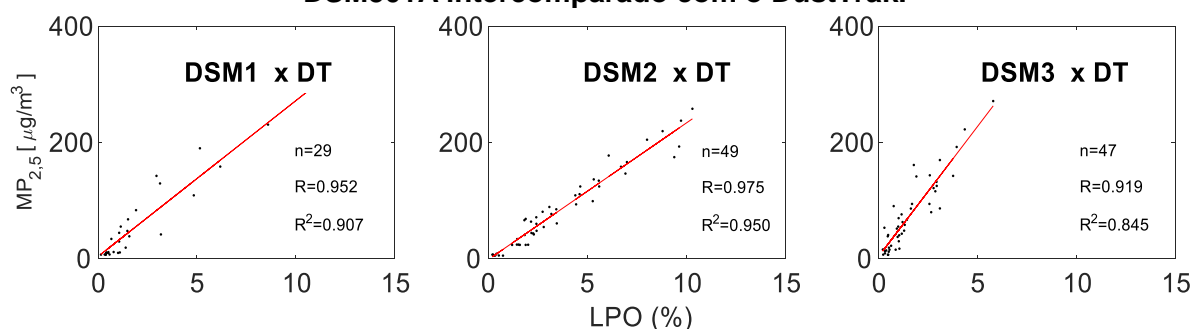


Fonte: Autoria própria (2017).

6.1.2.2 Linearidade de resposta

A Figura 19 mostra as intercomparações realizadas entre os sensores DSM1, DSM2 e DSM3 e o equipamento referência DustTrak, com dados a cada 1 minuto. Pode-se destacar o alto grau de correlação entre os sinais de saída dos sensores e o equipamento referência, com R^2 variando entre 0,85 e 0,95. O alto grau de correlação é comparável ao estudo de WANG *et al.* (2017), que obtiveram $R^2 = 0,95$ ao correlacionar o sensor DSM501A com o fotômetro SidePak, e ao estudo de SOUSAN *et al.* (2017), que obtiveram R^2 de 0,85 para um equipamento comercial baseado no sensor DSM501A, quando correlacionado com equipamento referência utilizando como fonte de partículas a *Arizona Road Dust*. Esses resultados reforçam a possível viabilidade de aplicação do sensor para resultados confiáveis de concentração de $MP_{2,5}$.

Figura 19: Dispersão dos dados de saída (LPO) coletados pelos três sensores DSM501A intercomparado com o DustTrak.



Fonte: Autoria própria (2017).

Os coeficientes angular e linear para a extração da equação de correção referente a cada sensor para a concentração de $MP_{2,5}$ são exibidos na Tabela 7. Os sensores DSM501A mostraram coeficientes angulares mais discrepantes entre as unidades, indicando uma maior heterogeneidade nas respostas e, portanto, sugerindo a necessidade de curvas de calibração individuais. O valor mais discrepante (44,66) ocorreu na calibração do sensor DSM3. O coeficiente linear representa o valor mínimo detectável com os sensores DSM501A. Os valores de b demonstram um bom limite de detecção para a operação dos sensores em situações com concentrações de $MP_{2,5}$ próximas a zero, exceto para o sensor DSM2 que indicou um b de $-1,48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, cuja aplicação é inapropriada.

Tabela 7: Coeficientes de correlação linear entre os sensores DSM501A e o equipamento referência DustTrak, calculados por meio do modelo matemático dos mínimos quadrados.

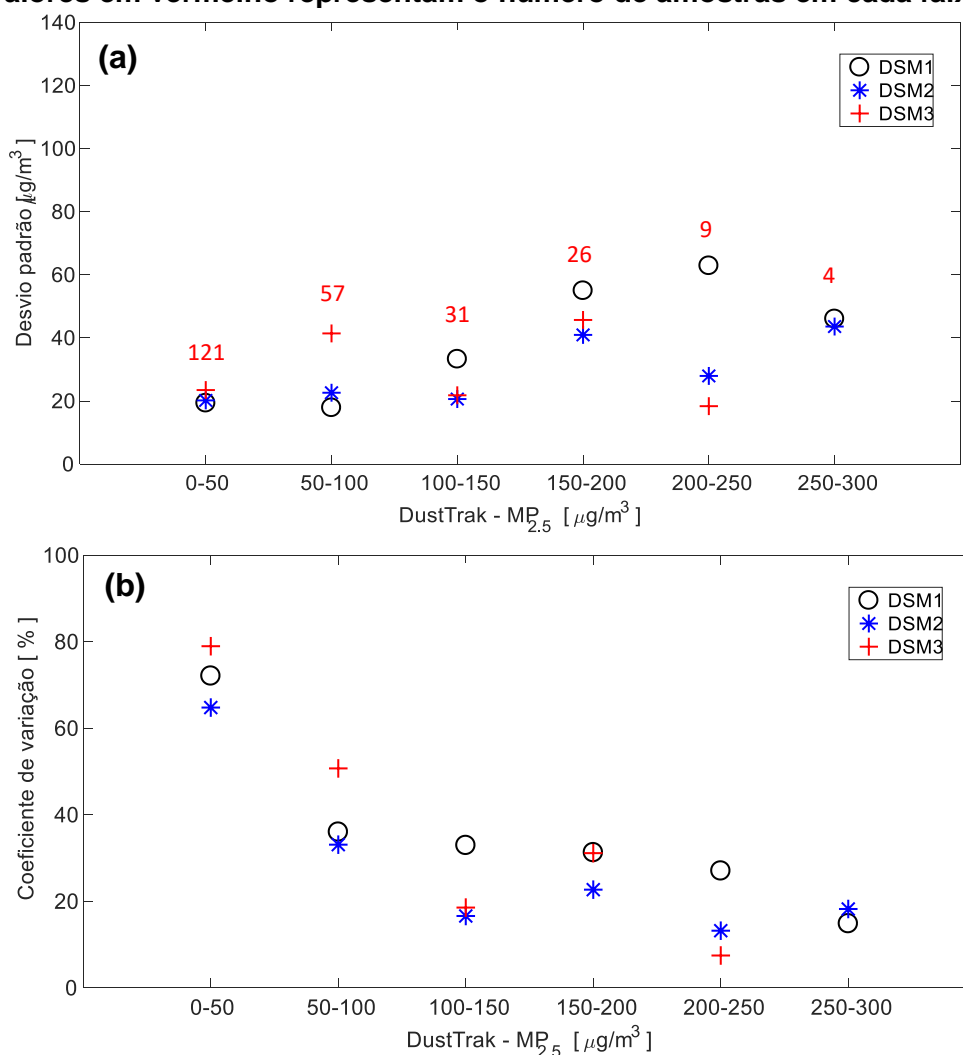
Sensor	a	b ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	R^2
DSM-1	26,77	4,3	0,91
DSM-2	23,50	-1,48	0,95
DSM-3	44,66	4,65	0,85

Fonte: Autoria própria (2017).

6.1.2.3 Precisão das medições

Para os sensores DSM501A, os valores de concentrações foram divididos em seis faixas em relação ao equipamento referência, variando de 0 a $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. A figura 20 ilustra os desvios padrões e coeficientes de variação para cada um dos sensores analisados, para medidas a cada 30 segundos.

Figura 20: Desvio padrão (a) e coeficientes de variação (b) para a variável $MP_{2,5}$. Valores em vermelho representam o número de amostras em cada faixa.



Fonte: Autoria própria (2017).

O desvio padrão para os diferentes sensores DSM501A variaram entre 17 e 62 $\mu g \cdot m^{-3}$ em toda a faixa de concentração, demonstrando variabilidade entre a resposta dos diferentes sensores, apesar de serem do mesmo modelo e marca. Os sensores demonstraram maior concordância até a faixa de 150 $\mu g \cdot m^{-3}$; a partir daí os valores de desvio padrão aumentaram. Esse fato comprova uma maior precisão dos sensores em baixas concentrações, mas não necessariamente uma maior exatidão em relação ao equipamento referência. Os coeficientes de variação para as diferentes faixas de concentração mostram valores maiores na faixa de 0 a 50 $\mu g \cdot m^{-3}$ (entre 65 e 85%), enquanto valores menores (máximo de 30%) foram encontrados em faixas de altas concentrações, indicando que a exatidão dos sensores melhora para essas faixas.

Esses resultados vão ao encontro dos demonstrados por WANG *et al.* (2015), que também relataram maior precisão dos sensores DSM501A em baixas concentrações, porém maior exatidão em faixas mais altas de concentrações de $MP_{2,5}$. Uma das sugestões propostas pelo autor para minimizar a amplitude do desvio padrão, seria a implantação de médias nos valores obtidos, que apesar de reduzir a frequência de coleta dos dados, diminuiria os erros encontrados. ZIKOVA *et al.* (2017) também encontraram respostas mais constantes e precisas em concentrações mais altas de $MP_{2,5}$, utilizando um equipamento comercial baseado no sensor DSM501A, ressaltando a variabilidade de resposta do sensor em relação ao equipamento referência em baixas concentrações. JOHNSON *et al.* (2016) também obtiveram menor exatidão entre um sensor similar ao DSM501A (PPD20V) e o DustTrak, quando operado em concentrações entre 0 e $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

No que tange o parâmetro de incerteza dos sensores em relação ao equipamento referência, os resultados variaram entre 0,5 e 2,2%, indicando que, de forma geral, os três sensores DSM501A apresentaram boa exatidão em relação ao DustTrak, apesar de variações para cada faixa de concentração avaliada.

6.2 APLICAÇÃO DA PLATAFORMA EM CAMPO

Após a plataforma ser calibrada em laboratório, iniciou-se o processo de instalação em campo nos pontos citados anteriormente. Por conta de limitações de disponibilidade de equipamentos e logística, foi escolhido um único ponto (Rua Humaitá) para intercomparar em campo com equipamentos referência. Para a escolha do ponto, foi levado em consideração fatores como segurança, estrutura e acesso às instalações locais.

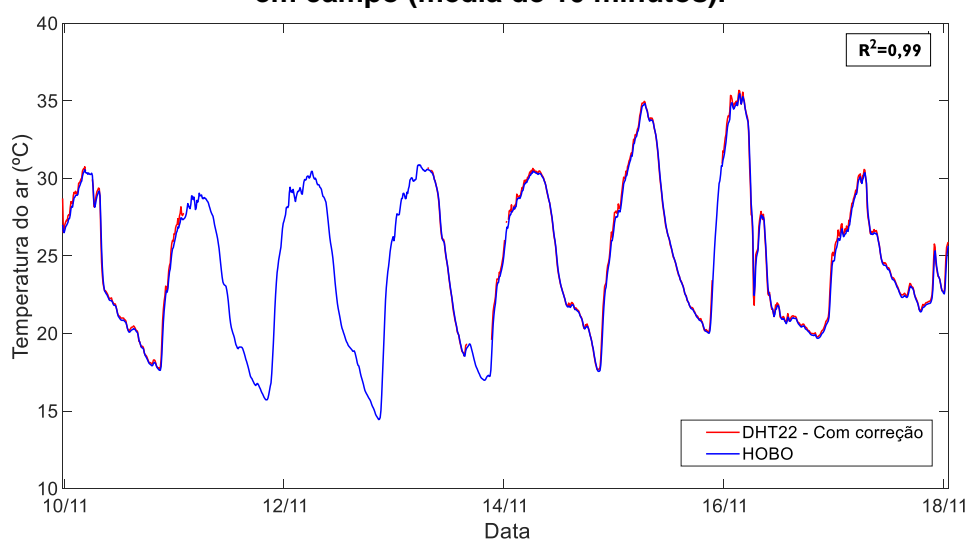
6.2.1 Intercomparação entre DHT22 e HOBO-U23

Para as variáveis temperatura e umidade do ar, a facilidade de instalação do equipamento referência possibilitou um período de intercomparação de oito dias. O acesso à internet e energia é crucial para o funcionamento da plataforma, porém em alguns casos esse acesso pode fugir ao controle, como em ocasiões de queda de energia nos locais instalados, ocasionando assim, perda de dados. Nesta intercomparação, houve perda de dados dos sensores no fim de semana por conta

de queda de energia no local. No entanto, a plataforma apresentou uma boa estabilidade de conexão e envio de dados, sendo afetada apenas em situações extremas. O período foi caracterizado por situações de tempo seco e chuvoso, possibilitando a verificação da qualidade dos dados dos sensores em ambas as situações, como mostram as Figuras 21 e 22.

Para a variável temperatura, observa-se um comportamento excelente do sensor em relação ao HOBO-U23, onde as curvas quase se sobrepõem, com R^2 muito próximo a um, atestando assim a qualidade das medidas e da correção aplicada. Vale destacar também a qualidade de resposta do sensor, acompanhando de forma precisa às variações de temperatura durante o período analisado.

Figura 21: Série temporal de temperatura medida com o sensor DHT22 e HOBO-U23 em campo (média de 10 minutos).



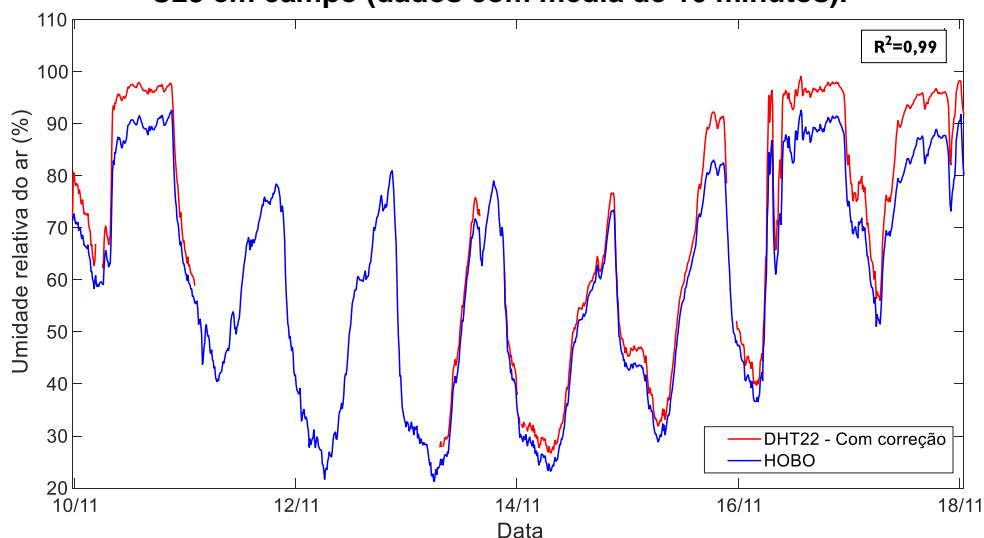
Fonte: Autoria própria (2017).

Para a variável umidade do ar, os resultados não foram tão bons como os de temperatura do ar, apesar de um R^2 muito próximo a um. As maiores discrepâncias na série temporal foram observadas em períodos mais úmidos (chuvosos), quando os valores do DHT22 ficaram acima dos valores do HOBO-U23. No entanto, o fabricante do HOBO-U23 garante uma precisão de $\pm 2,5\%$ (em valores de umidade) quando operado entre 0 e 90%. Essa precisão pode diminuir para dias mais úmidos (precisão de até $\pm 4,5\%$ entre 90 e 100%) como observados no início e final do experimento. Contudo, atesta-se também a qualidade de resposta do sensor, acompanhando de forma regular as variações de umidade durante o período

analisado.

Os valores de coeficiente de determinação tanto para temperatura, quanto para umidade são bem próximos aos encontrados por OJIMI (s.d.) de 0,99 e 0,97, respectivamente. O estudo foi conduzido utilizando como instrumento referência o modelo 41328VC (Young Company, EUA).

Figura 22: Série temporal de umidade relativa medida com o sensor DHT22 e HOBO-U23 em campo (dados com média de 10 minutos).



Fonte: Autoria própria (2017).

6.1.2 Intercomparação entre DSM501A e DustTrak

Para a variável $MP_{2,5}$, a dificuldade de instalação do equipamento referência em locais seguros e protegidos, de forma que fosse operado próximo a plataforma, impossibilitou períodos longos de intercomparação, além de perda de dados por conta de queda de energia no local. Sendo assim, foram analisados dois dias de intercomparação. O período foi caracterizado por situações de tempo chuvoso e seco, possibilitando a verificação da qualidade dos dados dos sensores em ambas as situações, como mostra a Figuras 23.

De forma geral, o DSM501A e o DustTrak se acompanham, exceto por períodos próximo às 13 h do dia 16 de novembro e 14h do dia 17 em que a resposta do microsenssor superestima os valores coletados pelo equipamento referência.

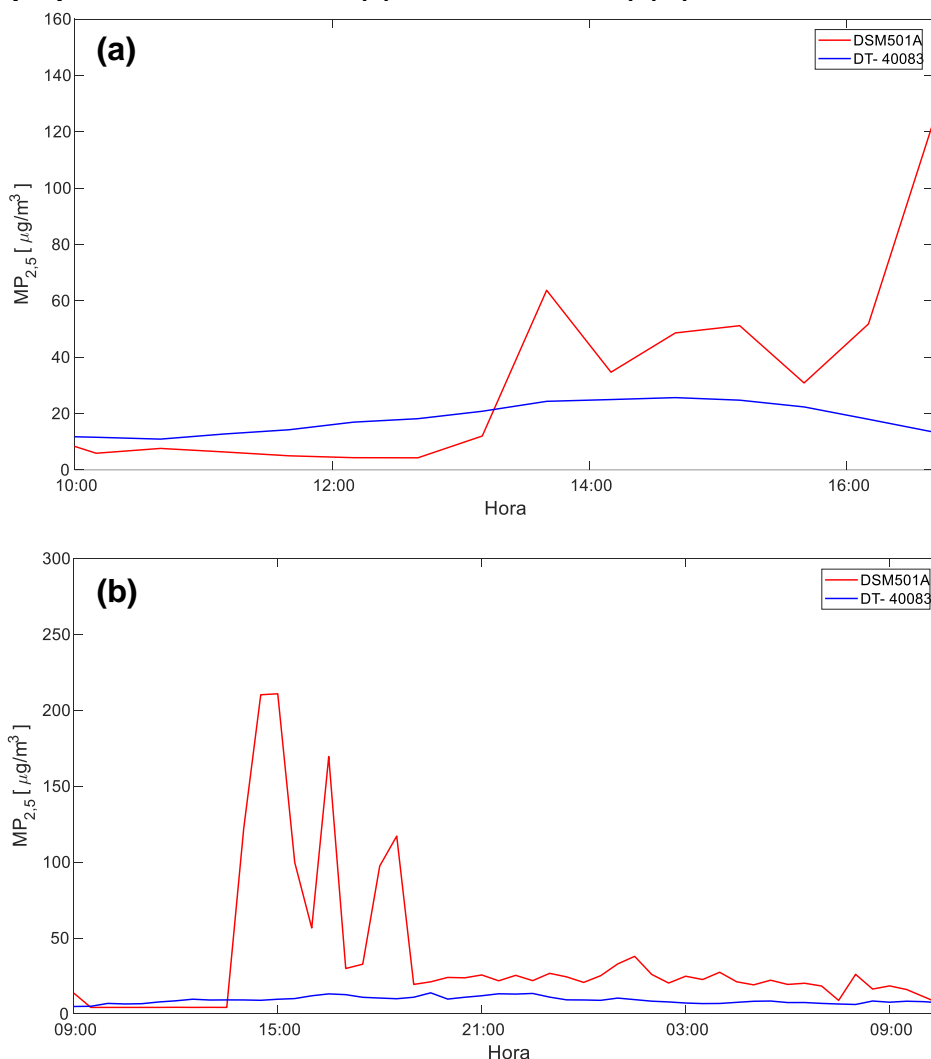
Essa resposta discrepante do sensor foi verificada também em outros estudos quando se trata da aplicação em ambiente urbano, com sensores iguais ou similares ao utilizado no presente estudo (ZIKOVA *et al.*, 2017; JOHNSON *et al.*, 2016; GAO

et al., 2015; HOLSTIUS *et al.*, 2014). Essa discrepância de resposta do sensor pode ser atribuída a variações e heterogeneidade na composição e tamanho das partículas atmosféricas em aplicações em campo. Em ambiente urbano elas são oriundas de diferentes fontes de emissão, enquanto as partículas de incenso utilizadas para a calibração em laboratório eram a única fonte de partículas e de composição homogênea. A correlação entre os sensores poderia ser melhorada por meio da realização de médias horárias das medições.

Além do possível efeito da composição das partículas sobre a resposta do sensor, a temperatura e, principalmente a umidade do ar, também podem influenciar o seu desempenho. A alta umidade relativa do ar observada durante o período em análise, pode ter ocasionado um crescimento geométrico das partículas, causando assim uma superestimação dos valores obtidos pelo sensor e assim tendenciado as medições (MANIKONDA *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2015). Como o DustTrak operou com um impactador de 2,5 μm , o crescimento ocorreu para partículas com diâmetros menores que esse tamanho, enquanto o DSM501A pode ter detectado partículas de diâmetros maiores que sofreram um maior crescimento, contribuindo consideravelmente para o aumento da massa.

Desse modo, tornam-se necessárias análises mais precisas sobre a dependência do tamanho e composição de partículas em variáveis como temperatura e umidade, e a influência na resposta do sensor em ambientes urbanos. Isso pode ser realizado através de campanhas em campo mais longas.

Figura 23: Série temporal de $MP_{2,5}$ medido com o sensor DSM501A e o DustTrak em campo para o dia 16/11/2017 (a) e 17-18/11/2017 (b) (média de 30 minutos).



Fonte: Autoria própria (2017).

6.3 IMPLANTAÇÃO DA PLATAFORMA WEB

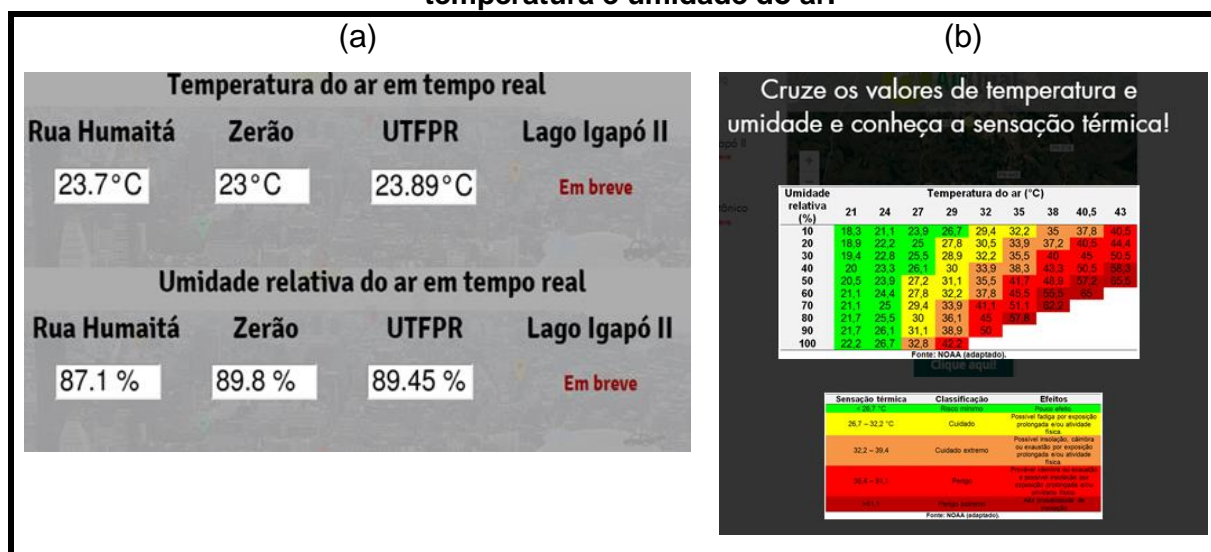
Para a visualização dos dados coletados pelas plataformas foi criado um site (www.rtairqual.com) com versões *desktop* e *mobile* para fornecimento de uma interface acessível para usuários, de forma que o acesso aos dados seja rápido e objetivo, com frequência de envio de 10 minutos. Ao entrar no site, o usuário pode navegar por meio de um mapa interativo, onde se apresentam os pontos em monitoramento de qualidade do ar e conforto térmico na cidade de Londrina (PR). Além disso, pode escolher a variável em questão para conhecer a situação em tempo real para cada local monitorado (Figura 24).

Figura 24: Captura de tela do site rtairqual.com, ilustrando mapa interativo de pontos monitorados.



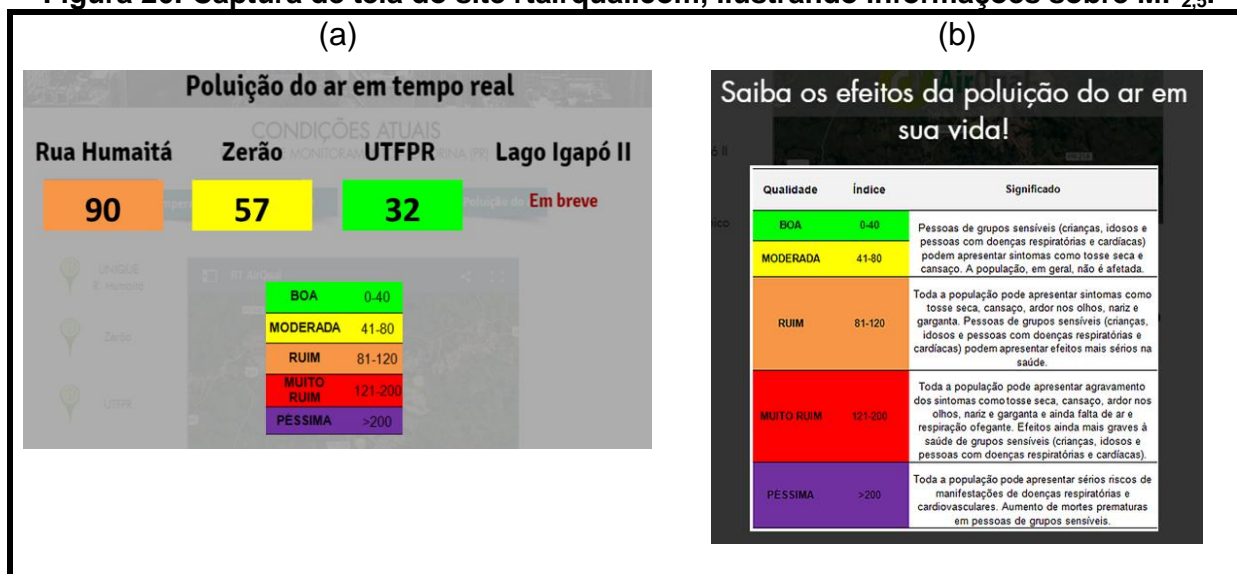
Para cada variável escolhida, o usuário além de conhecer a situação em tempo real, pode assimilar melhor a informação por meio de quadros explicativos. Para conforto térmico, pode relacionar os dados de temperatura e umidade relativa do ar e encontrar a faixa de sensação térmica, conhecendo os efeitos causados à saúde, por exemplo, no momento em questão (Figura 25).

Figura 25: Captura de tela do site rtairqual.com, ilustrando informações sobre temperatura e umidade do ar.



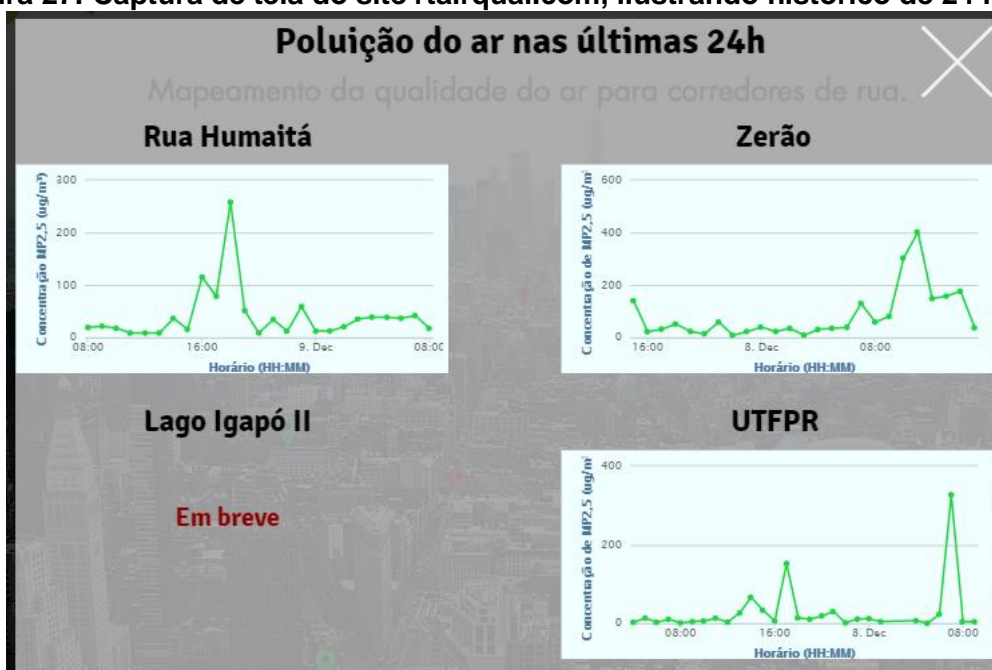
Em relação à qualidade do ar, os dados são mostrados em tempo real já com o cálculo de IQA realizado, conforme descrito anteriormente. Dessa forma, pessoas sem conhecimentos específicos sobre concentração de $MP_{2,5}$ podem entender de forma mais rápida a informação, relacionando os dados com os efeitos causados à saúde com base no quadro informativo. (Figura 26). Além disso, há a opção dentro do site de visualizar o histórico das últimas 24 horas pra cada variável e ponto desejado (Figura 27).

Figura 26: Captura de tela do site rtairqual.com, ilustrando informações sobre $MP_{2,5}$.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 27: Captura de tela do site rtairqual.com, ilustrando histórico de 24 horas.



Fonte: Autoria própria (2017).

7 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou a potencialidade de desenvolvimento de um sistema de monitoramento da qualidade do ar e conforto térmico, por meio de micro sensores, econômicos, portáteis e de fácil operacionalidade, aplicado ao conceito de cidade inteligente. Os sensores de temperatura e umidade relativa do ar (DHT22) e material particulado (DSM501A) avaliados apresentaram bom comportamento em relação aos equipamentos referência (HOBO-U23 e DustTrak), bem como boa estabilidade e eficiência de conexão *web* com e sem cabo ao longo da campanha, sendo afetada somente em casos extremos de queda de energia.

Para as variáveis temperatura e umidade, observaram-se boa precisão, baixíssima incerteza em relação aos dados do HOBO-U23 (menor que 1% para ambas as variáveis) bem como excelente correlação em todas as faixas analisadas durante o processo de calibração em laboratório. Em relação ao DSM501A, em faixas mais baixas de concentração ($0-50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), observou-se uma menor precisão quando comparada com faixas de concentrações mais altas ($>100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), demonstrando assim uma possível limitação de resposta do sensor em ambientes com baixas concentrações de $\text{MP}_{2.5}$. Apesar das restrições de precisão e exatidão do sensor DSM501A, a relação de incerteza com o DustTrak foi irrelevante, com valores máximos próximos a 2%. Ainda sobre os bons resultados de calibração em laboratório para ambos os sensores, vale destacar a necessidade de estabelecer procedimentos rigorosos durante a execução da calibração, que se forem ignorados podem causar oscilações na resposta dos sensores.

Durante a aplicação da plataforma em campo, uma série de fatores deve ser levada em consideração para a obtenção de bons resultados. Estruturas adequadas para instalações, segurança e proteção contra intempéries são cruciais para a implementação do sistema, bem como para a realização de intercomparações com equipamentos referência. Apesar das limitações encontradas, foram obtidos bons resultados de intercomparação, especialmente para a temperatura e umidade do ar. O desempenho do sensor DSM501A em ambiente urbano foi inferior aos resultados em laboratório, o que pode ser atribuído à influência de variáveis características das partículas e ambientais, como composição do aerossol atmosférico, temperatura e umidade do ar. Sendo assim, são necessárias análises mais longas e precisas do

comportamento do sensor em ambientes urbanos para obtenção de resultados mais satisfatórios em longo prazo.

O formato de parceria com estabelecimentos comerciais em pontos desejados para a instalação se mostrou uma boa estratégia para a implantação do sistema, sendo o funcionamento da plataforma afetado apenas em situações pontuais de queda de energia ou conexão. A plataforma *web* demonstrou ser um bom meio de disponibilização dos dados em tempo real, bem como para aquisição de série histórica de dados. A visualização dos dados de forma simples e objetiva com base em índices de conforto térmico e qualidade do ar facilitou a assimilação por pessoas sem conhecimento específico no assunto. Isso foi verificado por meio da disponibilização da plataforma *web* para pessoas leigas no assunto, que puderam entender e tirar conclusões com base nos dados expostos.

A metodologia de utilização de sensores de baixo custo oferece vantagem do ponto de vista econômico e de portabilidade para o monitoramento de dados ambientais, sendo utilizada de forma crescente atualmente. Apesar da facilidade de prototipação e coleta de dados com microcontroladores e sensores de baixo custo, devem ser tomados os devidos cuidados com procedimentos criteriosos de calibração em laboratório e implantação em campo. O sistema desenvolvido tem potencial para aplicação em diferentes pontos de uma mesma cidade, sendo útil para a criação de uma rede própria de monitoramento, ou para complementação de redes já existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, K.; PANDIAN, S. **A low-cost mobile urban environmental monitoring system**. In: 2013 4th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. IEEE, p. 659-664. 2013.

AOSONG ELECTRONICS CO.,LTD. **Dados técnicos sensor DHT22**. Disponível em: < <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> > Acesso em: 07 Dez. 2017.

ARDUINO. Arduino e Genuino Products. **Arduino/Genuino UNO**. 2017. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> > Acesso em: 07 Dez. 2017.

BAKICI, T. *et al.* **A smart city initiative: the case of Barcelona**. Journal of the Knowledge Economy, v. 4, n. 2, p. 135-148, 2013.

BALDAUF, R. *et al.* **Traffic and meteorological impacts on near-road air quality: Summary of methods and trends from the Raleigh near-road study**. J Air Waste Manage, v. 58, n. 7, p. 865-878, 2008.

BEELEN, R. *et al.* **Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project**. The Lancet, v. 383, n. 9919, p. 785-795, 2014.

BOGDAN, M. **How to Use the DHT22 Sensor for Measuring Temperature and Humidity with the Arduino Board**. ACTA Universitatis Cibiniensis, v. 68, n. 1, p. 22-25, 2016.

BOND, T. *et al.* **Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment**. J Geophys Res-Atmos, v. 118, n. 11, p. 5380-5552, 2013.

BORJA, J. **Counterpoint: Intelligent cities and innovative cities**. Universitat Oberta de Catalunya (UOC) Papers: E-Journal on the Knowledge Society, v. 5, 2007. Disponível em <<http://www.uoc.edu/uocpapers/5/dt/eng/mitchell.pdf>> Acesso em: 07 Dez. 2017.

BOWERMAN, B. *et al.* **The vision of a smart city**. In: 2nd International Life Extension Technology Workshop, Paris. 2000. Disponível em <<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/773961/>> Acesso em: 07 Dez. 2017.

BREITNER, S. *et al.* **Short-term effects of air temperature on mortality and effect modification by air pollution in three cities of Bavaria, Germany: a time-series analysis**. Sci Total Environ, v. 485, p. 49-61, 2014.

CAF. **Observatorio de Movilidad Urbana para América Latina**. Información para mejores políticas y mejores ciudades. Caracas: CAF. (2009). Disponível em: <<http://scioteca.caf.com/handle/123456789/422> > Acesso em: 07 Dez. 2017.

CARAGLIU, A. *et al.* **Smart cities in Europe**. Research Memoranda Series 0048 (VU University Amsterdam, Faculty of Economics, Business Administration and

Econometrics). 2009. Disponível em <<http://dspace.uvu.vu.nl/bitstream/handle/1871/15296/20090048.pdf?sequence=2>> Acesso em: 07 Dez. 2017.

CAREY, I. M. *et al.* **Mortality associations with long-term exposure to outdoor air pollution in a national English cohort.** Am J Resp Crit Care, v. 187, n. 11, p. 1226-1233, 2013.

CASERINI, S. *et al.* **Impact of the dropping activity with vehicle age on air pollutant emissions.** Atmos Pollut Res, v. 4, n. 3, p. 282-289, 2013.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Padrões de qualidade do ar.** São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/padroes-de-qualidade-do-ar/>>. Acesso em: 19 Set. 2017.

CHENG, Y. S. *et al.* **Incense smoke: characterization and dynamics in indoor environments.** Aerosol Sci Tech, v. 23, n. 3, p. 271-281, 1995.

CROUSE, D. L. *et al.* **Risk of nonaccidental and cardiovascular mortality in relation to long-term exposure to low concentrations of fine particulate matter: a Canadian national-level cohort study.** Environ Health Perspect, v. 120, n. 5, p. 708, 2012.

D'AMATO, G. *et al.* **Urban air pollution and climate change as environmental risk factors of respiratory allergy: an update.** J Invest Allerg and Clin, v. 20, n. 2, p. 95-102, 2010.

DEFELICE, T. P. **An introduction to meteorological instrumentation and measurement.** Prentice Hall, 1998.

DENATRAN. – Departamento Nacional de Trânsito. Estatística. **Frota de veículos-2017.** Disponível em <<http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/610-frota-2017>> Acesso em: 06 Dez. de 2017.

DETRAN PR. Departamento Nacional de Trânsito - PR., Frota de veículos por tipo e município. **Frota veículos cadastrados no estado do paraná - posição julho 2016.** Disponível em <http://www.detranspr.gov.br/arquivos/File/estatisticasdetransito/frotadeveiculoscadastradospr/2016/FROTA_2016_JULHO.pdf> Acesso em: 06 Dez. 2017.

DEVARAKONDA, S. *et al.* **Real-time air quality monitoring through mobile sensing in metropolitan areas.** In: Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD international workshop on urban computing. ACM, n. 15, p. 15. 2013.

DUNLEA, E. J. *et al.* **Technical note: Evaluation of standard ultraviolet absorption ozone monitors in a polluted urban environment.** Atmos Chem and Phys, v. 6, n. 10, p. 3163-3180, 2006.

ECOTECH ENVIRONMENTAL MONITORING Solutions . **Serinus 30 Carbon Monoxide Analyser, User Manual.** Disponível em: <<http://www.ecotech.com/wp->

content/uploads/2015/01/M010027-Serinus-30-CO-User-Manual-2.2.pdf> Acesso em: 06 Dez. 2017.

EEA. European Environment Agency, **The european environment**. State and Outlook 2010. Air Pollution, Copenhagen, 228 pages, 2010.

ELIASSON, J. **A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system**. Transport Res A- Pol, v. 43, n. 4, 468–480, 2009.

EPA. Environmental Protection Agency, **Air Sensor Guidebook**. Technical report, 2014. . Disponível em < <http://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/how-use-air-sensors-air-sensor-guidebook> >. Acesso em: 06 Dez. 2017.

EPA. Environmental Protection Agency. **Air Pollution**. 2017. Disponível em < <http://www2.epa.gov/learn-issues/air-resources#air-pollution> >. Acesso em: 06 Dez. 2017.

EPA. Environmental Protection Agency. **Sulfur Dioxide (SO₂) Pollution**. 2017. Disponível em < <https://www.epa.gov/so2-pollution> >. Acesso em: 06 Dez. 2017.

FLEISCHMAN, R *et al.* **Busses retrofitting with diesel particle filters: Real-world fuel economy and roadworthiness test considerations**. J Environ Sci, 2017.

FAJERSZTAJN, L. *et al.* **Air pollution: a potentially modifiable risk factor for lung cancer**. Nat Rev Cancer, v. 13, n. 9, p. 674, 2013.

FENGER, J. **Urban air quality**. Atmos Environ, v. 33, n. 29, p. 4877-4900, 1999.
HANWEI ELECTRONICS CO.,LTD. **Dados técnicos sensor MQ-9**. Disponível em: < <http://www.haoyuelectronics.com/Attachment/MQ-9/MQ9.pdf> > Acesso em: 06 Dez. 2017.

FUZZI, S. *et al.* **Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs**. Atmos Chem Phys, v. 15, n. 14, p. 8217-8299, 2015.

GAO, M. *et al.* **A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM_{2.5} in Xi'an, China**. Environ Pollut, v. 199, p. 56-65, 2015.

HAIR, J. F. *et al.* **Multivariate data analysis**. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, 1998.

HEI. Health Effects Institute. Panel on the health effects of traffic-related air pollution. **Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects**. 2010.

HERNANDEZ, H. X.; KALIL, F. **Viabilidade da plataforma Arduino e do protocolo ZigBee na elaboração de redes de sensores sem fio (RSSF)**. VII Mostra de Iniciação Científica e Extensão Comunitária – IMED. 2013.

HOLMAN, C. *et al.* **Review of the efficacy of low emission zones to improve**

urban air quality in European cities. Atmos Environ, v.111, p. 161-169, 2015.

HOLSTIUS, D.M. *et al.* **Field calibrations of a low-cost aerosol sensor at a regulatory monitoring site in California.** Atmos Meas Tech, v. 7, n. 4, p. 1121-1131, 2014.

IAP. Instituto Ambiental do Paraná. **Inventário estadual de emissões atmosféricas (MP, CO, NOx, SOx) e proposta para revisão e ampliação da rede de monitoramento de qualidade do ar do estado do Paraná.** P.160, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Cidades. **Informações sobre os municípios brasileiros.** Disponível em < <http://cod.ibge.gov.br/2V4X9>> Acesso em: 06 Dez. 2017.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **BDMEP Série Histórica.** Dados Mensais. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>> Acesso em: 06 Dez. 2017.

INN, E. C. Y.; TANAKA, Y. **Absorption coefficient of ozone in the ultraviolet and visible regions.** JOSA, v. 43, n. 10, p. 870-872, 1953.

JANSSEN, N. *et al.* **Health effects of black carbon.** Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2012.

JOHNSON, K. K. *et al.* **Using low cost sensors to measure ambient particulate matter concentrations and on-road emissions factors.** Atmos MeasTech. P. 1-22, 2016.

JOHANSSON, C.; BURMAN, L.; FORSBERG, B. **The effects of congestions tax on air quality and health.** Atmos Environ, v. 43, p. 4843–4854, 2009.

KATSOUYANNI, K. *et al.* **Evidence for interaction between air pollution and high temperature in the causation of excess mortality.** Arch Environ Health, v. 48, n. 4, p. 235-242, 1993.

KIELY, G. **Environmental Engineering.** McGraw-Hill International Editions, 1008 p. ISBN 0077091272, 1996.

KITTELSON, D. B. **Engines and nanoparticles: a review.** J Aerosol Sci, v. 29, n. 5, p. 575-588, 1998.

KRECL, P *et al.* **Characterisation and source apportionment of submicron particle number size distributions in a busy street canyon.** Aerosol Air Qual Res, v. 15, p. 220-233, 2015.

LIU, J. *et al.* **Developed urban air quality monitoring system based on wireless sensor networks.** In: Sensing Technology (ICST), 2011 Fifth International Conference on. IEEE, p. 549-554, 2011.

- LONDRINA. - Município de Londrina. **Plano municipal de saneamento básico**. 2015. Disponível em <
http://www.londrina.pr.gov.br/dados/images/stories/Storage/gabinete/PMSB/pmsb_c_ompleto_corrigido_2015.pdf> Acesso em 17 out. 2017.
- MANIKONDA, A. *et al.* **Laboratory assessment of low-cost PM monitors**. J Aerosol Sci, v. 102, p. 29-40, 2016.
- MARCEAU, J. **Introduction: Innovation in the city and innovative cities**. Innovation, v. 10, n. 2-3, p. 136-145, 2008.
- MARSHALL, J. D. *et al.* **Within-urban variability in ambient air pollution: comparison of estimation methods**. Atmos Environ, v. 42, n. 6, p. 1359-1369, 2008.
- MAYER, H. **Air pollution in cities**. Atmos Environ, v. 33, n. 24, p. 4029-4037, 1999.
- MCNAMARA, M. L. *et al.* **Correction factor for continuous monitoring of wood smoke fine particulate matter**. Aerosol Air Qual Res, v. 11, n. 3, p. 315, 2011.
- MIRAGLIA, S. G. K; GOUVEIA, N. **Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras**. Cienc Saude Coletiva, v. 19, n. 10, p. 4141-4147, 2014.
- MONKS, P. S. *et al.* **Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer**. Atmos Chem Phys, v. 15, n. 15, p. 8889-8973, 2015.
- MOREIRA, J. R. *et al.* **AutoControl: uma proposta para acessibilidade e segurança residencial com o apoio da plataforma Arduino**. Tecnologias em projeção, v. 4, n. 1, p. 01-09, 2013.
- NAM, T; PARDO, T. A. **Smart city as urban innovation: Focusing on management, policy, and context**. In: Proceedings of the 5th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance. ACM, 2011. p. 185-194.
- O'CONNELL, L. **Exploring the social roots of smart growth policy adoption by cities**. Soc Sci Quart, v. 89, n. 5, p. 1356-1372, 2008.
- OJIMI, O. **Temperature, Pressure, and Humidity (Tempredity) Quantifications From the Howard University Beltsville Campus Atmospheric Research Center in Beltsville, Maryland**. Reu Research Experience for Undergraduate Program.
- OMS. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Health effects of particulate matter**. 2013. Disponível em:
<http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf>. Acesso em: 06 Dez. 2017.
- OMS. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Preventing disease through**

healthy environments. A global assessment of the burden of disease from environmental risks. 2016. Disponível em: <http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/preventing-disease/en/>. Acesso em: 06 Dez. 2017.

ONSET COMPUTER CORPORATION. **HOBO® Pro v2 User's Manual.** 2010. Disponível em: < http://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/10694-H-MAN-U23.pdf > Acesso em: 06 Dez. 2017.

PAN, X. L. *et al.* **Correlation of black carbon aerosol and carbon monoxide in the high-altitude environment of Mt. Huang in Eastern China.** Atmos Chem Phys, v. 11, n. 18, p. 9735-9747, 2011.

PITZ, M. *et al.* **Variability of apparent particle density of an urban aerosol.** Environ Sci Tech, v. 37, n. 19, p. 4336-4342, 2003.

RAUB, J. A. *et al.* **Carbon monoxide poisoning—a public health perspective.** Toxicology, v. 145, n. 1, p. 1-14, 2000.

ROSARIO, N. E. *et al.* **Modeling the South American regional smoke plume: aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation.** Atmos Chem Phys, v. 13, n. 6, p. 2923-2938, 2013.

ROTHFUSZ, L. P. NWS Southern Region. **The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index).** Fort Worth, Texas: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology, v. 9023, 1990.

SALMOND, J.; MCKENDRY, I. **Influences of meteorology on air pollution concentrations and processes in urban areas.** Air Quality In Urban Environments, v. 28, p. 23, 2009.

SAMYOUNG S&C CO.,LTD. **Dados técnicos sensor DSM501A.** Disponível em: < <http://www.samyoungsnc.com/eng/m3/sub1.php> > Acesso em: 06 Dez. 2017.

SCHUBERT, E. *et al.* **Light-Emitting Diodes.** John Wiley & Sons, Inc., 2ª ed, 434 p. ISBN 0521865387, 2006.

SEINFELD, J., PANDIS, S. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change.** John Wiley & Sons, 3ª ed, 1152 p. ISBN 1118947401, 2016.

SILVA, F. R. *et al.* **Health risks and economic costs of absenteeism due to air pollution in Sao Paulo, Brazil.** Aerosol and Air Qual Res, v. 12, n. 5, p. 826-833, 2012.

SOUSAN, S. *et al.* **Evaluation of consumer monitors to measure particulate matter.** J Aerosol Sci, v. 107, p. 123-133, 2017.

STAMM, C. *et al.* **Urban population and dissemination of medium size cities in**

Brazil. Interações (Campo Grande), v. 14, n. 2, p. 251-265, 2013.

STEINLE, S. *et al.* **Quantifying human exposure to air pollution—Moving from static monitoring to spatio-temporally resolved personal exposure assessment.** Sci Total Environ, v. 443, p. 184-193, 2013.

STEADMAN, R. G. **The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science.** J Appl Meteor, v. 18, n. 7, p. 861-873, 1979.

TARGINO, A. C. *et al.* **Effects of the large-scale atmospheric circulation on the onset and strength of urban heat islands: a case study.** Theor Appl Climatol, v. 117, n. 1-2, p. 73-87, 2014.

TARGINO, A. C. *et al.* **Hotspots of black carbon and PM 2.5 in an urban area and relationships to traffic characteristics.** Environ Pollut, v. 218, p. 475-486, 2016.

TARGINO, A. C.; KRECL, P. **Local and regional contributions to black carbon aerosols in a mid-sized city in southern Brazil.** Aerosol and Air Qual Res, v.16, n. 1, p.125-137, 2016.

TASIĆ, V. *et al.* **Comparative assessment of a real-time particle monitor against the reference gravimetric method for PM 10 and PM 2.5 in indoor air.** Atmos Environ, v. 54, p. 358-364, 2012.

THERMO FISHER SCIENTIFIC INC. **Model 49i UV Photometric O3 Analyzer.** Instruction Manual Part number 102434-00. 2011. Disponível em: <<https://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/EPM-manual-Model%2049i.pdf>> Acesso em: 06 Dez. 2017.

TOPPETA, D. **The Smart City Vision: How Innovation and ICT Can Build Smart, “Livable”, Sustainable Cities.** The Innovation Knowledge Foundation. 2010. Disponível em <http://www.thinkinnovation.org/file/research/23/en/Toppeta_Report_005_2010.pdf> Acesso em: 06 Dez. 2017.

TORRES, J. D. *et al.* **Aquisição de dados meteorológicos através da plataforma Arduino: construção de baixo custo e análise de dados.** Scientia Plena, v. 11, n. 2, 2015.

TSI INCORPORATED. Model 8520 DUSTTRAK™ Aerosol Monitor. **Operation and Service Manual.** 1980198. 2010. Disponível em: <http://dustmonitors.ru/d/68562/d/dust_trak_8520-manual.pdf> Acesso em: 06 Dez. 2017.

VALLERO, D. **Fundamentals of Air Pollution.** Academic Press, p. 77-317, 2007.

WALLACE, L. A. *et al.* **Validation of continuous particle monitors for personal, indoor, and outdoor exposures.** J Expo Sci Env Epidv, v. 21, n. 1, p. 49, 2011.

WANG, Y.*et al.* **Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle**

sensors for particulate matter measurement. *Aerosol Sci and Tech*, v. 49, n. 11, p. 1063-1077, 2015.

WASHBURN, D. *et al.* **Helping CIOs Understand “Smart City” Initiatives: Defining the Smart City, Its Drivers, and the Role of the CIO.** Cambridge, MA: Forrester Research, Inc. 2010. Disponível em < <http://c3328005.r5.cf0.rackcdn.com/73efa931-0fac-4e28-ae77-8e58ebf74aa6.pdf>.> Acesso em: 06 Dez. 2017.

WIEDERKEHR, P.; YOON, S. **Air quality indicators.** In: **Urban Air Pollution-European Aspects.** Springer Netherlands, p. 403-418, 1998.

WILLIAMS, E. J. *et al.* **Comparison of ultraviolet absorbance, chemiluminescence, and DOAS instruments for ambient ozone monitoring.** *Environ Sci Tech*, v. 40, n. 18, p. 5755-5762, 2006.

WU, H. *et al.* **Identifying drivers for the intra-urban spatial variability of airborne particulate matter components and their interrelationships.** *Atmos Environ*, v. 112, p. 306-316, 2015.

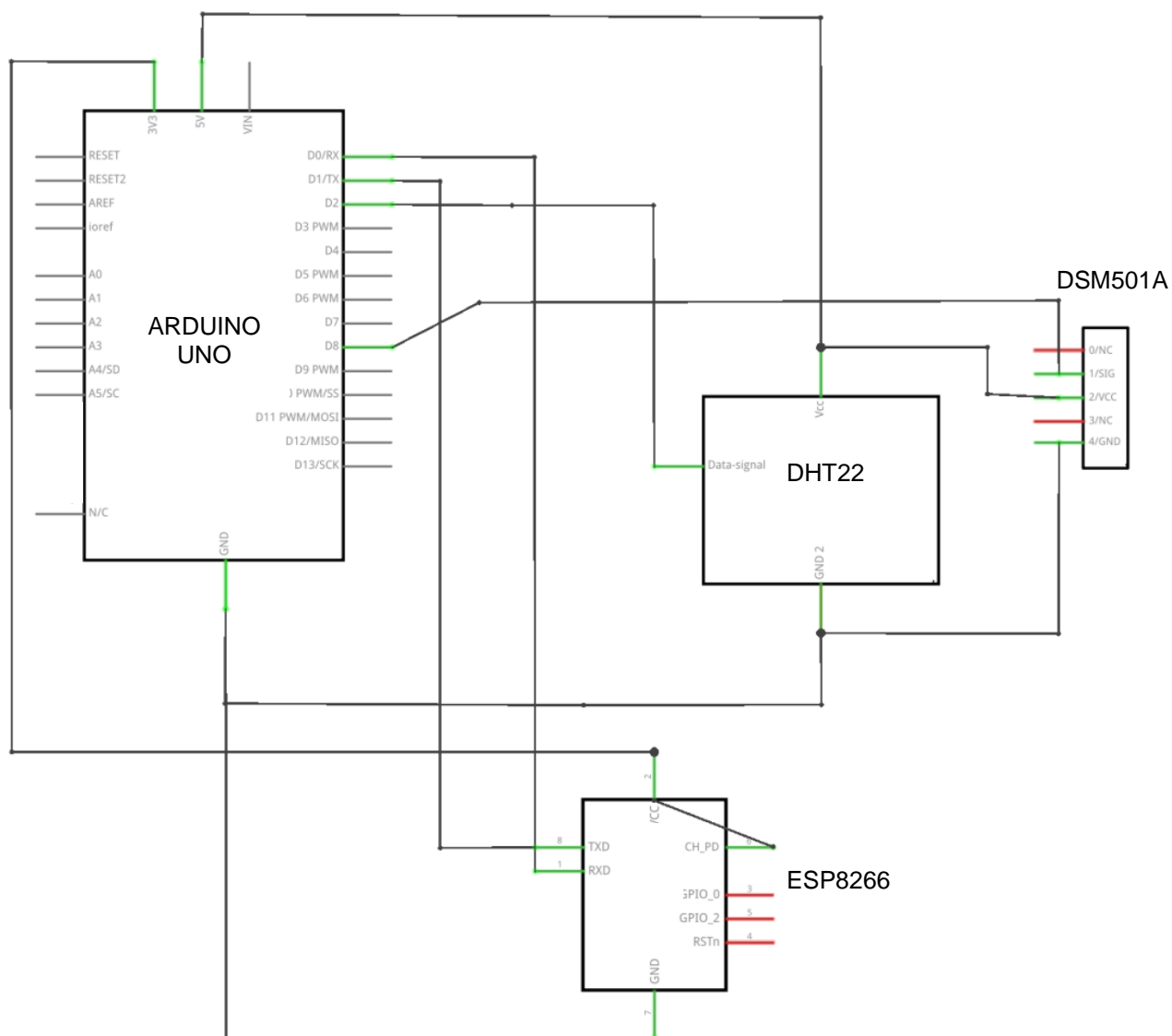
YIN, Z. *et al.* **Size-resolved effective density of urban aerosols in Shanghai.** *Atmos Environ*, v. 100, p. 133-140, 2015.

ZIKOVA, N. *et al.* **Evaluation of new low-cost particle monitors for PM 2.5 concentrations measurements.** *J Aerosol Sci*, v. 105, p. 24-34, 2017.

ZHENGZHOU WINSEN ELECTRONICS Technology CO.,LTD. **Dados técnicos sensor MQ-135.** Disponível em: < [http://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/mq131\(high-concentration\)-ver1_4-manual.pdf](http://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/mq131(high-concentration)-ver1_4-manual.pdf) >. Acesso em: 06 Dez. 2017.

ZUURBIER, M. *et al.* **Commuters' exposure to particulate matter air pollution is affected by mode of transport, fuel type, and route.** *Environmental Health Persp*, v. 118, n. 6, p. 783, 2010.

ANEXO A – Esquema elétrico da plataforma com micro sensores, desenvolvido utilizando o *software* Fritzing.



ANEXO B- Programação da plataforma realizada na IDE do Arduino.

```

#include <stdlib.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#define SSID "Login" //replace XXXXX by your router SSID
#define PASS "Senha" //replace YYYYYY by your router password
#define IP "184.106.153.149" // thingspeak.com IP
#define DHTPIN 5
#define DHTTYPE DHT22 // Sensor DHT 22 (AM2302)
String GET = "GET /update?key=YTR36V1UGTBZAYW8&field1="; //replace ZZZZZ
by your ThingSpeak channel write key
SoftwareSerial monitor(2, 3); //Serial communication to ESP8266 module (RX, TX)

//Variables
int dustPin = 8;
unsigned long duration;
unsigned long starttime;
unsigned long sampletime_ms = 30000;
unsigned long delay_time = 15000;
unsigned long lowpulseoccupancy = 0;
float ratio = 0;
float mp25 = 0;
float concentration = 0;

// Definições do sensor : pino, tipo
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
String h ;
//setup
void setup()
{
  //start serial communications

```

```

Serial.begin(9600);
monitor.begin(9600);
Serial.println("Initializing...");

//configure Arduino pins
pinMode(dustPin, INPUT);
dht.begin();
//communication with wifi module
monitor.flush();
monitor.println("AT");
delay(2000);
if(monitor.find("OK")){
  Serial.println("Communication with ESP8266 module: OK");
}
else {
  Serial.println("ESP8266 module ERROR");
}
//connect wifi router
connectWiFi();
Serial.print("Sampling (");
Serial.print(sampletime_ms/1000);
Serial.println("s)...");
//initialize timer
starttime = millis();

}

void loop(){
  //measuring dust particles
  duration = pulseIn(dustPin, LOW);
  lowpulseoccupancy = lowpulseoccupancy + duration;
  //30 seconds cicle
  if ((millis() - starttime) >= sampletime_ms)
  {

```

```

ratio = lowpulseoccupancy/(sampletime_ms*10.0); // percentage (de 0 a 100%)
mp25 = ((ratio*26.77)+ 4.3); //From Experiments

Serial.print("Ratio: ");
Serial.print(ratio);
Serial.print(" ");
Serial.print("MP2.5: ");
Serial.println(mp25);
lowpulseoccupancy = 0;

// //read other sensors
char buffer[10];
float u = dht.readHumidity();
float h = ((dht.readHumidity()*0.97)+ 4.68 );
float t = ((dht.readTemperature() * 0.99) + 0.56);

Serial.print(" ");
Serial.print("Temp: ");
Serial.println(t);

Serial.print(" ");
Serial.print("Umid: ");
Serial.println(h);

//convert sensor values to strings
String humidityStr = dtostrf(h, 4, 1, buffer);
humidityStr.replace(" ", "");
String temperatureStr = dtostrf(t, 4, 1, buffer);
temperatureStr.replace(" ", "");
String dustStr = dtostrf(mp25, 4, 1, buffer);
dustStr.replace(" ", "");
//send data to ThingSpeak, humidityStr, temperatureStr,dustStr,
updateSensors( temperatureStr,humidityStr, dustStr);
//wait next sampling cycle

```

```

Serial.print("Wait ");
Serial.print(delay_time/1000);
Serial.println("s for next sampling");
Serial.println();
delay(delay_time);
//initialize new cycle
Serial.println();
Serial.print("Sampling (");
Serial.print(sampletime_ms/1000);
Serial.println("s)...");
starttime = millis();
}
}
//Send data to ThingSpeak /String luminanceStr, String humidityStr, String
temperatureStr, String uvStr, String CO3Str ,
void updateSensors( String temperatureStr, String humidityStr, String dustStr) {
String cmd = "AT+CIPSTART=\"TCP\",\"";
cmd += IP;
cmd += "\",80";
monitor.println(cmd);
delay(2000);
cmd = GET;
cmd += "&field1=";
cmd += temperatureStr;
cmd += "&field2=";
cmd += humidityStr;
cmd += "&field3=";
cmd += dustStr;
cmd += "\r\n";
delay(1000);
int strsize = cmd.length();
monitor.println("AT+CIPSEND=" + String(strsize));
delay(2000);
monitor.print(cmd);

```

```
if(monitor.find("OK")){
    Serial.println("Transmission completed with success");
}else{
    Serial.println("Transmission failed!");
}
}
void sendDebug(String cmd){
    Serial.print("SEND: ");
    Serial.println(cmd);
    monitor.println(cmd);
}
boolean connectWiFi(){
    Serial.println("Connecting wi-fi...");
    String cmd = "AT+CWMODE=1";
    monitor.println(cmd);
    delay(2000);
    monitor.flush(); //clear buffer
    cmd="AT+CWJAP=\"";
    cmd+=SSID;
    cmd+="\", \"";
    cmd+=PASS;
    cmd+="\"";
    monitor.println(cmd);
    delay(5000);
    if(monitor.find("OK")){
        Serial.println("Connection succeeded!");
        return true;
    }else{
        Serial.println("Connection failed!");
        return false;
    }
    Serial.println();
}
```